



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA**

“Propuesta de implementación de mantenimiento preventivo basado en la confiabilidad, para mejorar la disponibilidad de equipos y maquinaria críticos, en línea de molienda de la Empresa Minera Antamina – Ancash”

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

AUTOR:

Laguna Oblitas Román Alex (ORCID: 0000-0002-5714-9733)

ASESOR:

MSc. Sifuentes Inostroza Martín (ORCID: 0000-0001-8621-236X)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Sistema y planes de mantenimiento

TRUJILLO – PERÚ

2020

DEDICATORIA

A DIOS

Por la vida y las experiencias
que ha puesto en mi camino,
pues su guía y su sabiduría,
me ayudaron a formar mi
personalidad.

A MI AMADA HIJA ALESSA

Por ser el punto de apoyo, en esta
jornada de superación y motivación
de mi vida; pues el sólo recordarla,
me significó tomar ganas para ser su
ejemplo y orgullo.

A MIS PADRES Y HERMANOS:

Por todo lo que hicieron y hacen por mí,
siempre firmes conmigo y siendo mi
principal soporte en los momentos de
mayores retos.

AGRADECIMIENTO

Doy gracias a Dios por ser siempre guía en mi vida y fortaleza en mis experiencias tanto laborales, como académicas y permitirme hoy arribar a una posición tan anhelada por mí y mi familia, como es lograr ser profesional en Ingeniería Mecánica. Eléctrica.

Agradezco también a la Universidad César Vallejo, porque gracias a ella, sus docentes y mis compañeros, viví años muy importantes para mí, donde pude aprender diversas enseñanzas para mi vida personal y profesional. Asimismo, mi agradecimiento especial a mis asesores el Dr. Jorge Antonio Inciso Vásquez y el MSc. Martín Sifuentes Inostroza, por su orientación y apoyo en la concretización de la presente tesis.

Mi agradecimiento a la empresa Minera Antamina, por ser la institución que me alberga y me ha permitido acceder a la obtención de datos e información valiosos para la presente tesis; en sus profesionales he encontrado gran apoyo para realizar y desarrollar mi investigación y siempre el aliento de apoyo para conseguir el objetivo trazado.

ÍNDICE

| | |
|--|------|
| DEDICATORIA..... | ii |
| AGRADECIMIENTO..... | iii |
| ÍNDICE..... | iv |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | v |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | vii |
| RESUMEN..... | vii |
| ABSTRACT..... | viii |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 12 |
| II. MÉTODO..... | 28 |
| 2.1 Tipo y diseño de investigación..... | 28 |
| 2.2 Operacionalización de variables..... | 29 |
| 2.3 Población, muestra y muestreo:..... | 31 |
| 2.4 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos..... | 31 |
| 2.5 Procedimiento..... | 32 |
| 2.6 Método de análisis de datos..... | 34 |
| 2.7 Aspectos Éticos..... | 34 |
| III. RESULTADOS..... | 35 |
| 3.1 Evaluación de las condiciones actuales de mantenimiento de equipos y maquinarias del sector de molienda y principales indicadores, utilizando técnicas de mantenimiento..... | 35 |
| 3.2 Estimación de los indicadores de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad después del proceso de mejora y sustentar los costos-beneficio y recuperación de la inversión..... | 83 |
| IV. DISCUSIÓN..... | 88 |
| V. CONCLUSIONES..... | 90 |
| VI. RECOMENDACIONES..... | 92 |
| VII. REFERENCIAS..... | 93 |
| VIII. ANEXOS..... | 94 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1: ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO | 12 |
| FIGURA 2: CURVA DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO. | 16 |
| FIGURA 3: CURVA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO..... | 16 |
| FIGURA 4: CURVA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PREDICTIVO | 17 |
| FIGURA 5: METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN DEL RCM..... | 18 |
| FIGURA 6: METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN DEL RCM | 19 |
| FIGURA 7: ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE FALLO. FALLO IMPORTANTE..... | 19 |
| FIGURA 8: ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE FALLOS..... | 20 |
| FIGURA 9: DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA ELABORACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LAS RECOMENDACIONES DE LOS FABRICANTES. | 21 |
| FIGURA 10: FLUJO DE ELABORACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN ANÁLISIS DE FALLOS | 21 |
| FIGURA 11: HOJA DE INFORMACIÓN | 22 |
| FIGURA 12: HOJA DE DECISIÓN | 22 |
| FIGURA 13: RELACIÓN ENTRE EL TIEMPO MEDIO DE REPARACIÓN (MTTR), TIEMPO MEDIO HASTA LA AVERÍA (MTTF) Y TIEMPO MEDIO DE REPARACIÓN (MTBF). | 23 |
| FIGURA 14: DISPONIBILIDAD = TIEMPO DISPONIBLE /TIEMPO CALENDARIO..... | 23 |
| FIGURA 15: DEFINICIÓN DE MTBF & MTTR..... | 23 |
| FIGURA 16: REGISTRO DE VIBRACIONES EN UN CICLO DE TRABAJO DE LA PALA..... | 24 |
| FIGURA 17: ESPECTROS TÍPICOS DE VIBRACIONES EN RODAMIENTOS | 25 |
| FIGURA 18: ESPECTRO DE UNA TERMOGRAFÍA | 26 |
| FIGURA 19: DIAGRAMA DE FLUJO DEL ESTUDIO. | 33 |
| FIGURA 20: ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE COMPONENTES DE SISTEMA DE MOLIENDA – ANTAMINA..... | 44 |
| FIGURA 21: PUNTOS DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MOTOR. | 47 |
| FIGURA 22: MONTAJE DE RODAMIENTOS Y ROTOR EN BOMBA DE AGUA AL MOLINO PRINCIPAL..... | 48 |
| FIGURA 23: EQUIPO PARA ANÁLISIS DE ACEITES EN TALLER OILVIEW QUICK CHECK..... | 50 |
| FIGURA 24: ANALIZADOR DE VIBRACIONES | 51 |
| FIGURA 25: CÁMARA TERMOGRÁFICA..... | 53 |
| FIGURA 26: ANALIZADOR DE ACEITE SKF TMEH 1 | 54 |
| FIGURA 27: ALINEADOR DE EJES TKSA 41 | 55 |
| FIGURA 28: BALANCEADOR DINÁMICO DE ROTORES, COMPUTARIZADO..... | 56 |
| FIGURA 29: ESQUEMAS DE PROCESOS | 58 |
| FIGURA 30: INGRESO DE AGUA A CHUTE DE ALIMENTACIÓN DEL MOLINO SAG..... | 60 |
| FIGURA 31: INGRESO DE LECHADA DE CAL AL CHUTE DE ALIMENTACIÓN DEL MOLINO SAG. | 60 |
| FIGURA 32: MOVIMIENTO DEL MINERAL AL INTERIOR DEL MOLINO SAG. | 61 |
| FIGURA 33: IMAGEN DEL TROMMEL DEL MOLINO SAG..... | 61 |
| FIGURA 34: PARTES INTERNAS DEL MOLINO SAG | 62 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 35: DIAGRAMA GENERAL DEL PROCESO DE MOLIENDA | 63 |
| FIGURA 36: DIAGRAMA DE PROCESO PROCESAMIENTO DE MOLIENDA DE MINERALES | 64 |
| FIGURA 37: DIAGRAMA DE ÁRBOL DE FALLAS DEL SISTEMA DE MOLINOS | 64 |
| FIGURA 38: ÁRBOL LÓGICO DE DECISIONES DEL MCC [9] | 65 |
| FIGURA 39: VISTA DE MOLINO DE MINERALES | 67 |
| FIGURA 40: ESQUEMA DE MOLINO ALIMENTADO CON FAJA..... | 68 |
| FIGURA 41: SISTEMA DE BOMBEO E INYECCIÓN DE AGUA AL MOLINO..... | 68 |
| FIGURA 42: EVACUACIÓN DE MINERAL DEL MOLINO SAG | 69 |
| FIGURA 43: VISTA LATERAL DEL MOLINO SAG | 69 |
| FIGURA 44: VISTA SUPERIOR DE ALIMENTACIÓN CON LECHADA DE CAL AL MOLINO SAG | 71 |
| FIGURA 45: ESQUEMA DE MANDO HIDRÁULICO DEL MOLINO SAG | 71 |
| FIGURA 46: DIAGRAMA LÓGICO DE FALLAS DEL SISTEMA DE MOLINOS..... | 74 |
| FIGURA 47: ÁRBOL LÓGICO DE DECISIÓN DEL RCM..... | 78 |
| FIGURA 48: DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA ELABORACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LAS RECOMENDACIONES DE LOS FABRICANTES | 80 |
| FIGURA 49: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA ELABORACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN EL ANÁLISIS DE FALLOS..... | 81 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| TABLA 1: RANGOS DE SEVERIDAD DE VIBRACIÓN | 25 |
| TABLA 2: <i>OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES</i> | 29 |
| TABLA 3: TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE ESTUDIO..... | 31 |
| TABLA 4: DATOS Y RESULTADOS DE ANÁLISIS DEL MTTR. MOLINO SAG, AÑO 2017 | 35 |
| TABLA 5: <i>DATOS Y RESULTADOS DE ANÁLISIS DEL MTTF MOLINO SAG, AÑO 2017</i> | 36 |
| TABLA 6: CÁLCULO DE DISPONIBILIDAD ANUAL DEL MOLINO SAG: | 37 |
| TABLA 7: TÉCNICAS PREDICTIVAS A APLICAR EN SISTEMA MECÁNICO EXTERNO E INTERNO DEL MOLINO <i>FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA</i> | 45 |
| TABLA 8: TÉCNICAS PREDICTIVAS QUE APLICAR EN SISTEMA DE BOMBEO DE PULPA BAJO MOLINOS | 46 |
| TABLA 9: DATOS TÉCNICOS LUBRICACIÓN | 55 |
| TABLA 11: DATOS TÉCNICOS - BALANCEO DINÁMICO | 56 |
| TABLA 12: LISTADO Y CODIFICACIÓN DE EQUIPOS | 57 |
| TABLA 13: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS – MOLINO SAG | 59 |
| TABLA 14: FUNCIONES DE SUBSISTEMAS Y EQUIPOS SIGNIFICATIVOS INTEGRADOS EN CADA SUBSISTEMA. 66 | |
| TABLA 15: FALLAS FUNCIONALES Y TÉCNICAS. | 73 |
| TABLA 16: ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE FALLO. FALLO CRÍTICO | 75 |
| TABLA 18: ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE FALLO..... | 76 |
| TABLA 19: TAREAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA SISTEMA DE MOLIENDA | 77 |
| TABLA 20: RESULTADOS DE ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD | 84 |
| TABLA 21: <i>CUADRO RESUMEN COMPARATIVO</i> | 87 |

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es proponer estrategias de implementación de mantenimiento preventivo basado en la confiabilidad, para mejorar la disponibilidad de equipos y maquinaria críticos en línea de molienda de la empresa minera Antamina Ancash, bajo los requerimientos en su contexto operacional. Para lograr este objetivo se realizó una evaluación de la situación actual del sistema de molienda de minerales, determinando sus parámetros de mantenimiento: disponibilidad anual, confiabilidad en el tiempo y los tiempos medios de operación hasta la falla y el de reparación.

Mediante la técnica del análisis de criticidad, se determinó el subsistema del proceso de molienda más crítico: el molino SAG. Se determinaron las técnicas predictivas a implementar, en base a un historial. Asimismo, se aplicó la filosofía de mantenimiento centrado en confiabilidad, elaborando un plan para el subsistema más crítico y llegando a la conclusión que es necesario utilizar técnicas predictivas para medir parámetros que identifican fallas y permitir tomar las medidas para su eliminación.

Se prepararon el diagrama de confiabilidad, el diagrama de árbol de fallas, formatos de registro de datos y de resultados de las técnicas predictivas a ser aplicadas, como también se determinó la frecuencia de aplicación de técnicas predictivas.

Se hizo el análisis económico, determinando el monto de inversión en dispositivos predictivos, así como el beneficio económico a ser obtenido, en función del tiempo de falla reducido y, se determinó el tiempo de retorno de la inversión.

Finalmente se realizó un análisis de los resultados obtenidos para mejorar las condiciones actuales del subsistema. El análisis de MCC al subsistema más crítico permitió obtener un 80 % como mínimo de actividades preventivas y un 20 % como máximo de actividades correctivas, en una primera etapa y luego mejorarlas.

El beneficio resultante, es eliminar las actividades preventivas innecesarias que se vienen realizando en el frente de la empresa minera Antamina de Ancash.

Palabras clave: Mantenimiento, criticidad, confiabilidad, disponibilidad, inversión.

ABSTRACT

The main objective of this work is to propose preventive maintenance implementation strategies based on reliability, to improve the availability of critical equipment and machinery in the milling line of the mining company Antamina Ancash, under the requirements in its operational context. To achieve this objective, an assessment was made of the current situation of the mineral grinding system, determining its maintenance parameters: annual availability, reliability in time and average operating times until failure and repair.

Through the technique of criticality analysis, the sub-system of the most critical grinding process was determined: the SAG mill. The predictive techniques to be implemented were determined, based on a history. Likewise, the philosophy of maintenance focused on reliability was applied, developing a plan for the most critical sub-system and concluding that it is necessary to use predictive techniques to measure parameters that identify failures and allow measures to be taken to eliminate them.

The reliability diagram, the fault tree diagram, data recording formats and the results of the predictive techniques to be applied were prepared, as well as the frequency of application of predictive techniques.

The economic analysis was made, determining the amount of investment in predictive devices, as well as the economic benefit to be obtained, based on the reduced failure time and, the investment return time was determined.

Finally, an analysis was made of the results obtained to improve the current conditions of the sub-system. The MCC analysis of the most critical sub-system allowed obtaining a minimum of 80% of preventive activities and a maximum of 20% of corrective activities, in a first stage and then improving them.

The resulting benefit is to eliminate the unnecessary preventive activities that have been carried out at the front of the mining company Antamina de Ancash.

Keywords: Maintenance, criticality, reliability, availability, investment

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la presente investigación tiene como objetivo dos cosas fundamentales; Presentar una metodología diseñada para reducir las posibles fallas existentes en los equipos y sistemas incrementando su eficiencia.

Antamina como planta minera situada en el departamento de Ancash, obtiene los recursos minerales provenientes del subsuelo, los cuales son procesados en la concentradora, luego, y gracias al minero-ducto (tubería subterránea de 304 Km.), son trasladados hacia el puerto propio situado en Huarney, donde finalmente son embarcados en buques para su exportación. (ver siguiente figura).

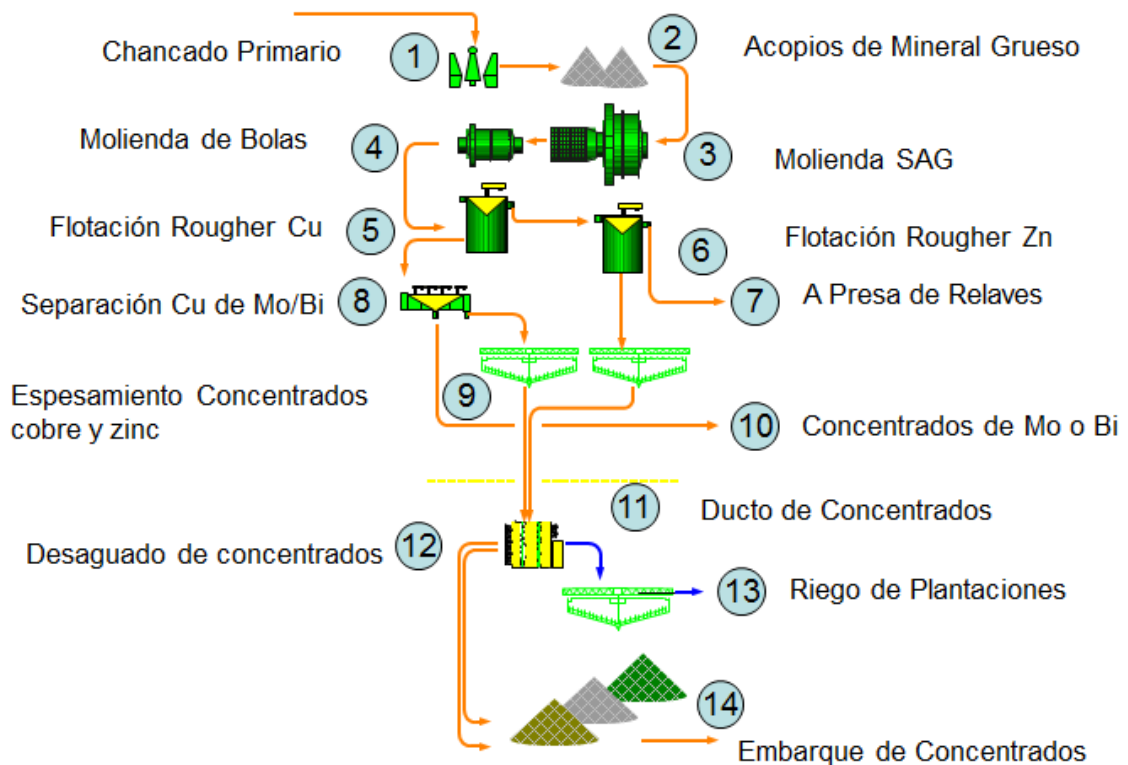


Figura 1: Esquema general del proceso

Fuente: Minera Antamina – Dpto. Producción

Se ha observado que el proceso de Molienda produce cuellos de botella, por paradas a causa de fallas en la maquinaria principal, ocasionando pérdidas de producción. Las fallas se deben a fenómenos de desgaste, como abrasión, impacto,

corrosión, que reducen rápidamente la vida útil de los elementos que están en contacto directo con los minerales metálicos.

Durante el año 2017 se han tenido varios tiempos de parada de producción por fallas, lo que ha causado una baja en los indicadores de mantenimiento, como son la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, además de lucro cesante por pérdida de producción. El mantenimiento preventivo realizado a los equipos de molienda se basa en recomendaciones de fabricantes, de catálogo y en aportes de los técnicos, en base a su experiencia, no se basan en mediciones que detectan las fallas funcionales y técnicas.

El presente estudio propone el diseño e implementación de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad en la línea de molienda, para aumentar la disponibilidad y asegurar la capacidad de producción programada, en base a 341 días por año.

En tal sentido se analizó el registro de fallas, y su impacto en la capacidad de producción y se determinó que el mantenimiento preventivo en base a tiempos y a catálogos no era muy preciso para obtener buenos indicadores de mantenimiento, por lo que se planteó incluir la aplicación de técnicas predictivas, para medir y detectar las causas de fallas en su estado inicial, y, en función de su estado, programar el equipo industrial para su mantenimiento preventivo.

Se realizó el análisis de criticidad para determinar cuáles son los equipos a los que se les deberá aplicar técnicas predictivas: Análisis vibracional, análisis de viscosidad de aceite, detección de fugas de gases, análisis de componentes de desgaste en equipos críticos.

Se determinó luego, la frecuencia de aplicación de técnicas predictivas, a fin de tener un modo racional de aplicación de las mismas; es decir, se plantea en el circuito de molienda primaria (molino SAG), el pase de un sistema de mantenimiento preventivo basado en tiempo de operación y en catálogos, a mantenimiento preventivo basado en técnicas predictivas, monitoreando los equipos críticos y aplicando el mantenimiento según el estado en que se encuentren, dando como resultado mejores indicadores de mantenimiento.

Se ha calculado el monto de inversión a ser aplicado en la compra de equipos y demás para el nuevo sistema de mantenimiento. Se determinó el beneficio económico y el período estimado de retorno de la inversión, el cual es 2.5 años.

Si bien es cierto que Antamina cuenta con equipos de técnicas predictivas, como son analizadores de vibraciones, analizadores de aceites, termografía, etc., no se tiene una sección de mantenimiento predictivo, que coordine con el departamento de producción, se planifique y lleve a cabo de una manera racional, la aplicación este tipo de mantenimiento. Existe una importante cantidad de horas de parada de producción por fallas de equipos, obligando a realizar correcciones in situ, de manera “reactiva”, ocasionando paradas de producción, que significa importante pérdida económica.

Por lo tanto, conocida la problemática, se enuncia enfáticamente la formulación del problema: ¿En qué medida la implementación del mantenimiento preventivo basado en la confiabilidad permitirá mejorar la disponibilidad de equipos y maquinaria críticos en línea de molienda de la empresa minera Antamina Ancash?

Finalmente (Sierra 2014), en su tesis denominada “Programa de Mantenimiento preventivo para la empresa Metal Mecánica Industrias AVM S.A.”, plantea como objetivo general el Garantizar la disponibilidad y confiabilidad operacional de los equipos de la planta de producción, en forma eficiente y segura, contribuir para el cumplimiento de la política de calidad establecida por la empresa y llega a las conclusiones realización del diagnóstico del “estado del arte del mantenimiento” en la empresa, conociendo las fortalezas y debilidades al respecto. Se evaluó al personal calificado y la infraestructura necesaria para atender las necesidades de mantenimiento. En cuanto al mantenimiento preventivo se diseñaron actividades de acuerdo a las necesidades de la empresa, la misma que tiene un sistema de información que permite llevar el registro detallado de los trabajos, materiales, repuestos, tiempo empleado y costos. Se elaboró el manual de procedimiento de mantenimiento general de acuerdo a los requerimientos de la norma ISO 9000-2000.

Habiendo culminado la revisión de los trabajos referentes indicados en líneas anteriores, debemos establecer algunos conceptos respecto al tema de nuestra investigación, desde lo elemental a lo específico. Es así entonces que debemos iniciar

con el principal como es la definición de Mantenimiento, el cual es considerado como “El conjunto de tareas realizadas por el usuario para mantener la funcionabilidad del sistema durante su vida operativa” (Avila, 1992).

El mantenimiento, por excelencia, tiene sus indicadores:

– **Disponibilidad (A)**

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (1)$$

– **Indicador Tiempo Promedio Entre Fallas (TPEF o MTBF)**

MTBF: Mean Time between failures (Tiempo medio entre fallas)

$$\text{Indicador de confiabilidad} = \frac{TTO}{TB_1 + TB_2 + TBFN} \quad (2)$$

Dónde:

TTO: *Tiempo total de operación*

TBF: Tiempo entre fallas.

– **Tiempo Promedio para Reparación (TPPR o MTTR)**

MTTR: Mean time to restore (Tiempo medio para restaurar).

$$\text{Indicador de mantenibilidad} = \frac{TTR}{NF} \quad (3)$$

Dónde:

TTR: Tiempo total empleado para restaurar la operación después de cada falla.

NF: Número de fallas.

– **Indicador de Costos**

$$\text{Indicador de costos} \left(\frac{NS}{TM} \right) = \frac{\text{Costo de mantenimiento(NS/período)}}{\text{Producción realizada(TM/período)}} \quad (4)$$

Resulta de dividir los costos que se ha involucrado el tener un equipo operativo entre la utilidad que ha generado el tener alquilado los equipos.

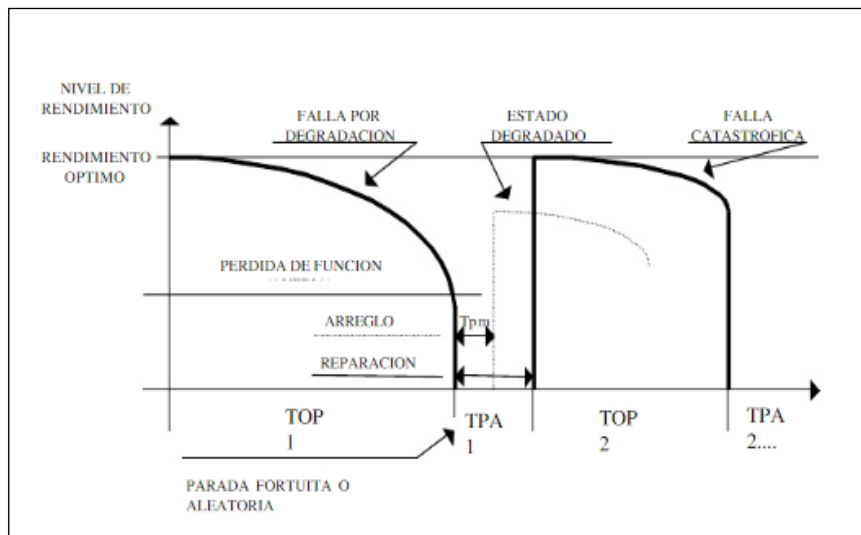


Figura 2: Curva de mantenimiento correctivo.

Fuente y Elaboración: MOUBRAY, John.

Coste en inventarios: el coste en inventarios sigue siendo alto aunque previsible, lo cual permite una mejor gestión.

Mano de obra: se necesitará contar con mano de obra intensiva y especial para períodos cortos, para liberar el equipo para el servicio lo más rápidamente posible.

Cualquiera sea el nivel de mantenimiento preventivo aplicado, subsistirán fallas residuales de carácter aleatorio.

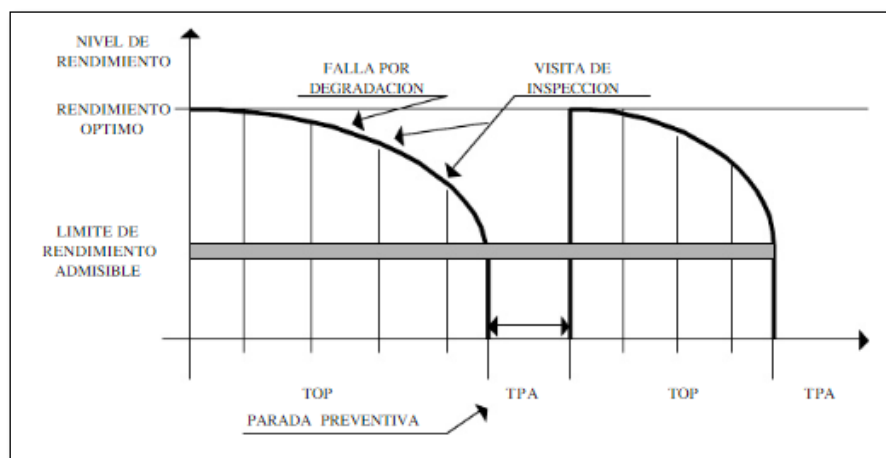


Figura 3: Curva de mantenimiento preventivo.

Fuente y Elaboración: MOUBRAY, John.

Se conoce el tiempo límite de actuación que no implique el desarrollo de un fallo imprevisto y tomar decisiones sobre la parada de una línea de máquinas en momentos críticos (Moubray, 2004).

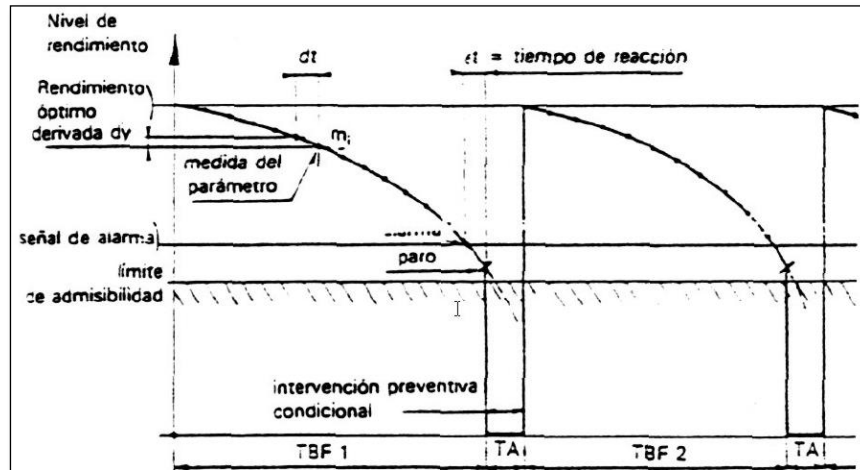


Figura 4: Curva de mantenimiento preventivo predictivo

Fuente y Elaboración: MOUBRAY, John.

- **Mantenimiento centrado en la Confiabilidad**, definido por Anthony Smith como el RCM (Reliability Centered Maintenance): Gestión de mantenimiento, en la cual un equipo multidisciplinario de trabajo optimiza la confiabilidad operacional de un sistema que funciona bajo condiciones de trabajo definidas, estableciendo las actividades más efectivas de mantenimiento en función de la criticidad de los equipos.

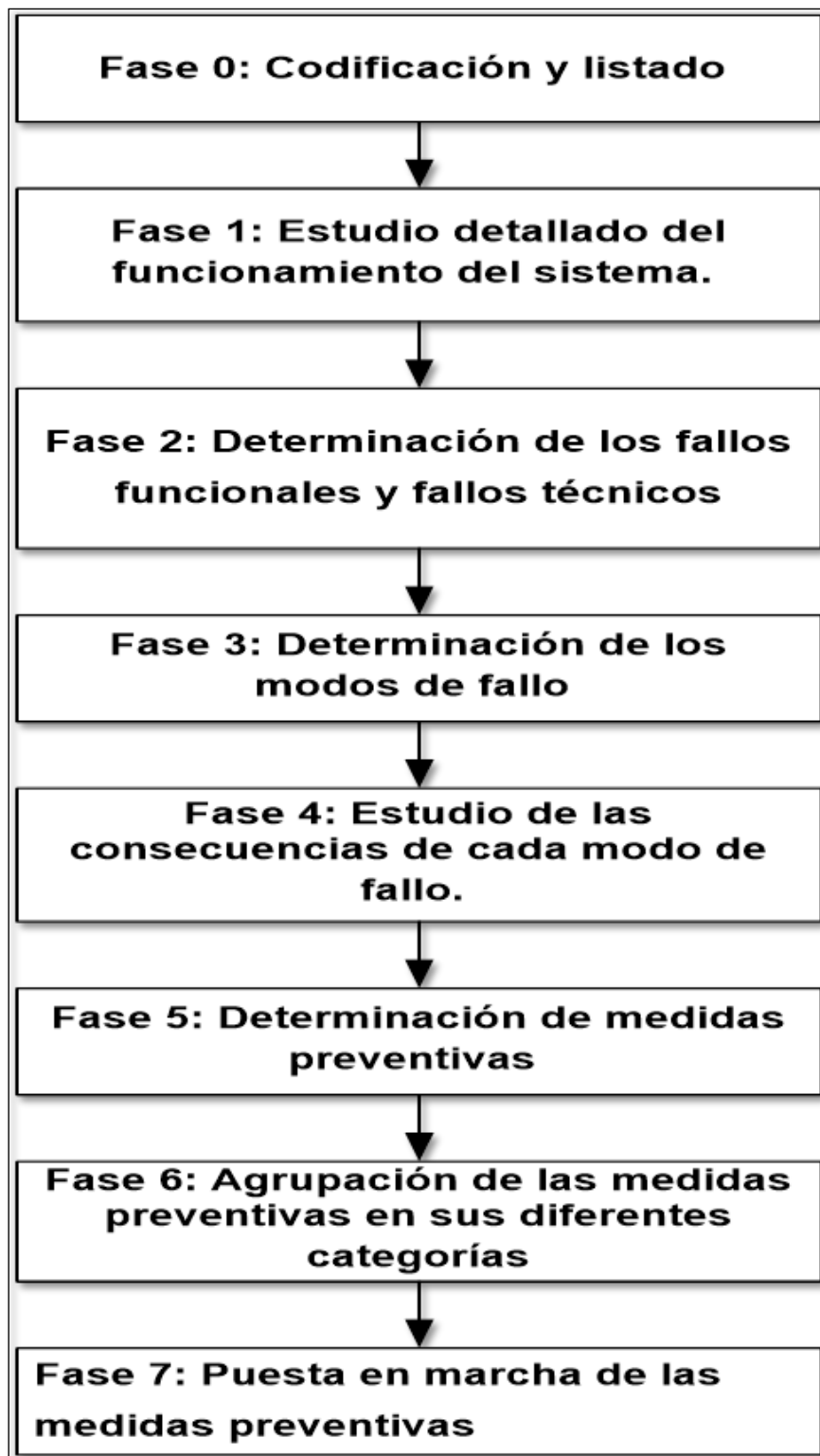


Figura 5: Metodología de implementación del RCM
Fuente: (Moubray, 2004)

Dentro de la metodología descrita y las fases indicadas, importantes son los conceptos:

- Análisis de la gravedad de los fallos: **Críticidad**, que determina la gravedad de las consecuencias. La primera pregunta a responder en cada modo de fallo es: ¿qué pasa si ocurre? Una explicación de lo que sucederá será suficiente, se puede valorar sus consecuencias en seguridad y medio ambiente, producción y el mantenimiento. Existen tres posibles casos: fallo sea crítico, que el fallo sea importante o que sea tolerable.

CRÍTICO

| ANÁLISIS DE CRÍTICIDAD DE FALLOS | | |
|--|---|--|
| SEGURIDAD Y MEDIOAMBIENTE | PRODUCCIÓN | MANTENIMIENTO |
| Accidente grave probable | Supone parada o afecta a potencia o rendimiento | Alto coste de reparación (>10.000 Eur) |
| Accidente grave, pero muy poco probable | Afecta a potencia y/o rendimiento, pero el fallo es poco probable | Coste medio de reparación (1.000-10.000 Eur) |
| Poca influencia en seguridad y medioambiente | No afecta a la producción | Bajo coste de reparación (<1.000 Eur) |

Figura 6: Metodología de implementación del RCM

Fuente: (Moubray, 2004)

| ANÁLISIS DE CRÍTICIDAD DE FALLOS | | |
|--|---|--|
| SEGURIDAD Y MEDIOAMBIENTE | PRODUCCIÓN | MANTENIMIENTO |
| Accidente grave probable | Supone parada o afecta a potencia o rendimiento | Alto coste de reparación (>10.000 Eur) |
| Accidente grave, pero muy poco probable | Afecta a potencia y/o rendimiento, pero el fallo es poco probable | Coste medio de reparación (1.000-10.000 Eur) |
| Poca influencia en seguridad y medioambiente | No afecta a la producción | Bajo coste de reparación (<1.000 Eur) |

IMPORTANTE

Figura 7: Análisis de criticidad de fallo. Fallo Importante

Fuente: (Asociación Latinoamericana de Mantenimiento, 2011)

| ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE FALLOS | | | | | |
|---|--|---|--|--|--|
| SEGURIDAD Y MEDIOAMBIENTE | | PRODUCCIÓN | | MANTENIMIENTO | |
| Accidente grave probable | | Supone parada o afecta a potencia o rendimiento | | Alto coste de reparación (>10.000 Eur) | |
| Accidente grave, pero muy poco probable | | Afecta a potencia y/o rendimiento, pero el fallo es poco probable | | Coste medio de reparación (1.000-10.000 Eur) | |
| Poca influencia en seguridad | | No afecta a la producción | | Bajo coste de reparación (<1.000 Eur) | |
| TOLERABLE | | | | | |

Figura 8: Análisis de criticidad de fallos

Fuente: (Asociación Latinoamericana de Mantenimiento, 2011)

- Obtención del plan de mantenimiento y agrupación de medidas preventivas. -
Determinadas las medidas preventivas para evitar los fallos, el siguiente paso es agrupar estas medidas por tipos:
 - Tareas de mantenimiento,
 - Mejoras,
 - Procedimientos de operación,
 - Procedimientos de mantenimiento y formación

Plan de Mantenimiento, que es el principal objetivo buscado. El plan de mantenimiento lo componen el conjunto de tareas de mantenimiento resultante del análisis de fallos; cuya puesta en marcha está determinado por la sustitución del Plan anterior por el resultante del estudio realizado, convenientemente revisado, incluidas la información del fabricante.

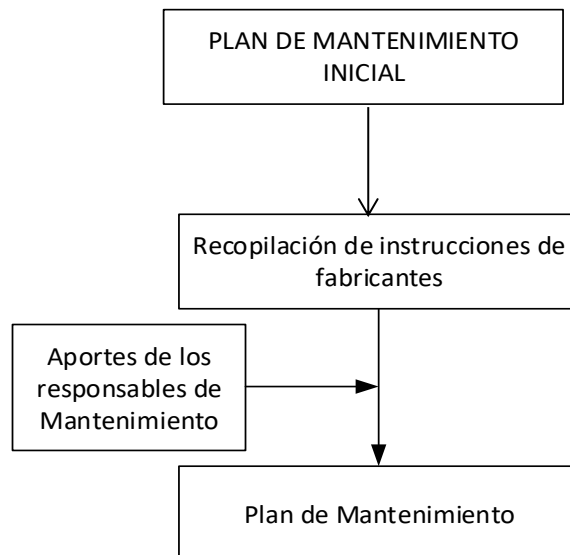


Figura 9: Diagrama de flujo para la elaboración de un plan de Mantenimiento basado en las recomendaciones de los fabricantes.

Fuente: Elaboración propia

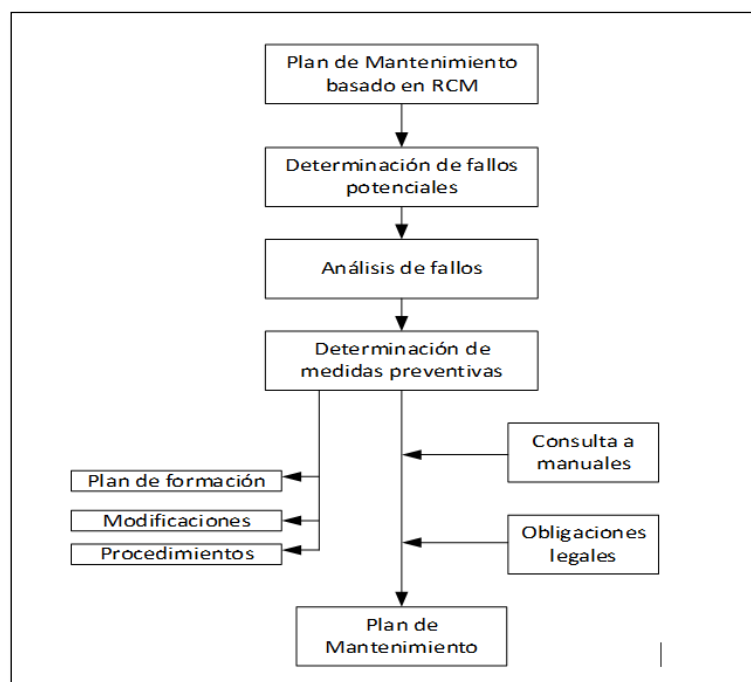


Figura 10: flujo de elaboración del plan de Mantenimiento basado en análisis de fallos

Fuente: Elaboración propia

Hoja de información

Es la hoja donde es asentada la información recopilada en los primeros cuatro pasos del MCC, es decir las funciones, fallas funcionales, modos de fallas y los efectos de las fallas.

| | | | | | |
|--------------------------------------|--|---------------------------------|--------------------------------------|---|-------|
| EMPRESA MINERA ANTAMINA SAC | | SISTEMA ACTIVO | NR | RECOPILADO POR | FECHA |
| | | SUBSISTEMA /COMPONENTE | REF | REVISADO POR | FECHA |
| FUNCIÓN | | FUNCIÓN (Pérdida de función) | MODO DE FALLA (Causa de falla) | EFECTO DE FALLA (Qué sucede cuando ocurre la falla) | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Figura 11: Hoja de información

Fuente: MOUBRAY, John.

Hoja de decisión

En ella se clasifican el tipo de consecuencia que tiene la falla (fallas ocultas, para la seguridad y el medio ambiente, operacionales y no operacionales).

| | | | | | | | | | | | | |
|--|----|----|------------------------------------|---|---|---|---------------------------|----|---------|-------------------|-------|------|
| EMPRESA MINERA ANTAMINA SAC | | | ACTIVO | | | | | | SISTEMA | RECOPILADO POR | FECHA | HOJA |
| | | | COMPONENTE | | | | | | REF: | REVISADO POR | FECHA | DE |
| Referencia Información | | | Evaluación de las consecuencias | | | | TAREAS 'A FALTA FALLA' | | | TAREAS PROPUESTAS | | |
| | | | H | S | E | O | H1 | H2 | H3 | | | |
| F | FF | FM | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

Figura 12: Hoja de Decisión

Fuente: MOUBRAY, John.

El árbol lógico de decisión,

Es una herramienta diseñada por el MCC, que permite seleccionar la tarea de mantenimiento más adecuada.

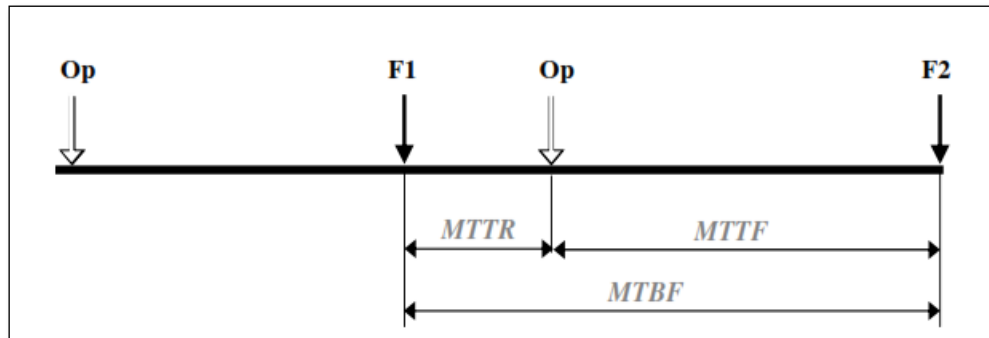


Figura 13: Relación entre el tiempo medio de reparación (MTTR), tiempo Medio hasta la avería (MTTF) y tiempo medio de reparación (MTBF).

Fuente: *www.monografias.com*

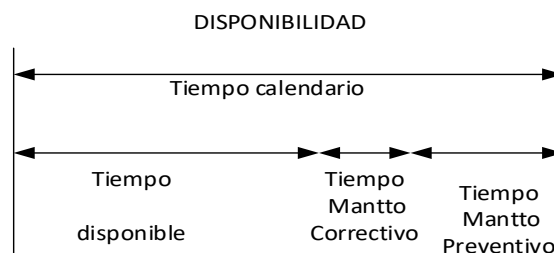


Figura 14: Disponibilidad = Tiempo disponible /Tiempo calendario

Fuente: *www.monografias.com*

Considerando que al reparar un sistema este queda como nuevo (en las mismas condiciones que cuando se puso en funcionamiento por primera vez).

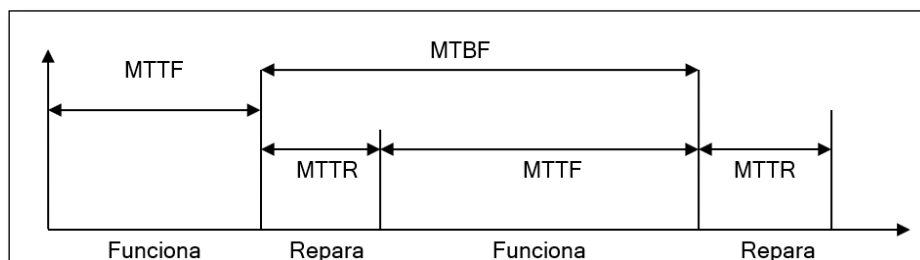


Figura 15: Definición de MTBF & MTTR

Fuente: *www.monografias.com*

$$CRT = FF \times C$$

Dónde:

- ✓ $CRT = Criticidad$
- ✓ $FF = Frecuencia \text{ de falla}$
- ✓ $C = consecuencia$
- ✓ $Consecuencia = IO \times FO + CM + IS \text{ y } M_{\Delta}$

Análisis de vibraciones.

El interés de las Vibraciones Mecánicas llega al Mantenimiento Industrial con el Mantenimiento Preventivo y Predictivo, con el interés de alerta que significa un elemento vibrante en una máquina, y la necesaria prevención de las fallas que ocasionan a medio plazo.

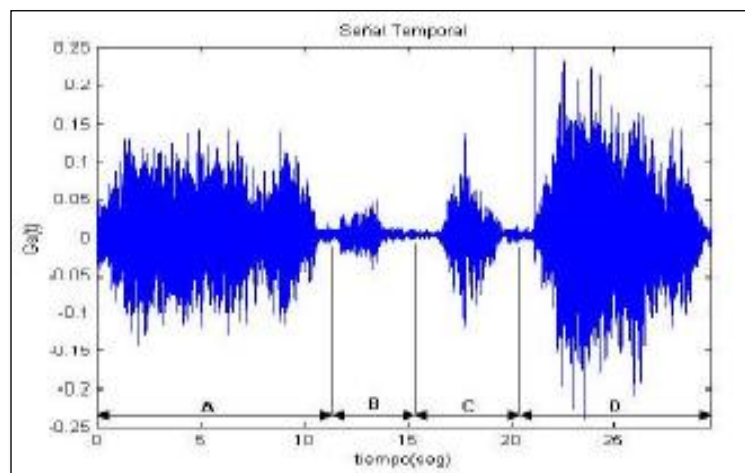


Figura 16: Registro de vibraciones en un ciclo de trabajo de la pala
Fuente: Norma ISO 2372

Normas de severidad de vibraciones

Una guía de referencia para distinguir entre un funcionamiento normal o admisible de la máquina y un nivel de alerta lo constituyen las normas ISO 2372.

Si la vibración aumenta 10 veces, está será inadmisibile y habrá que intervenir.

| RANGO DE SEVERIDAD DE VIBRACION | | CLASES DE MÁQUINAS | | | |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------|----------|-----------|----------|
| VELOCIDAD RMS (mm/s) | VELOCIDAD 0-PK (mm/s) | CLASE I | CLASE II | CLASE III | CLASE IV |
| 0.28 | 0.3960 | A | A | A | A |
| 0.45 | 0.6364 | | | | |
| 0.71 | 1.0041 | | | | |
| 1.12 | 1.5839 | B | B | B | B |
| 1.8 | 2.5456 | | | | |
| 2.8 | 3.9598 | C | C | C | C |
| 4.5 | 6.3640 | | | | |
| 7.1 | 10.0409 | D | D | D | D |
| 11.2 | 15.8392 | | | | |
| 18 | 25.4558 | | | | |
| 28 | 39.5980 | | | | |
| 45 | 63.6396 | | | | |
| 71 | 100.4092 | | | | |
| FSM para las máquinas | | 1.57020 | 1 | 0.62608 | 0.39625 |
| FSN para los niveles (1/FSM) | | 0.63686 | 1 | 1.59725 | 2.52364 |

Tabla 1: Rangos de severidad de vibración

Fuente: Normas ISO 2372.

Nota:

- ✓ FSM: Factor de servicio para las clases de máquinas

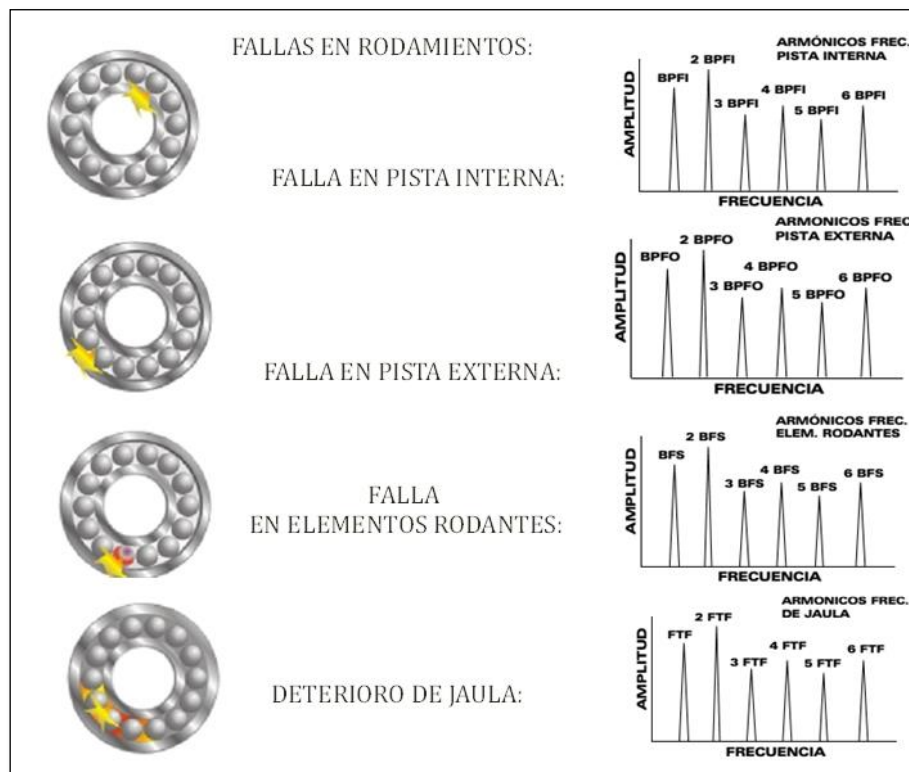


Figura 17: espectros típicos de vibraciones en rodamientos

Fuente: Manual de rodamientos SKF

- **Termografía.**

La Termografía Infrarroja es una técnica que permite, a distancia y sin ningún contacto, medir y visualizar temperaturas de superficie con precisión.

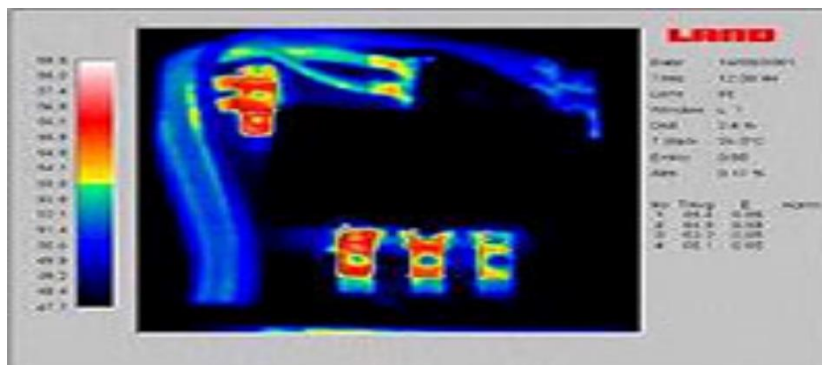


Figura 18: Espectro de una termografía

Fuente: IRD

Intervalo de inspecciones predictivas:

$$I = -\frac{C_i * F_i}{C_f * \lambda} * \ln(1 - e^{-\lambda})$$

Expresado en años por inspección.

Frecuencia de aplicación de inspecciones predictivas

$$f \left[\frac{\text{Veces}}{\text{Año}} \right] = \frac{1}{I} = -\frac{C_f * \lambda}{C_i * F_i * \ln(1 - e^{-\lambda})} =$$

Es el inverso de la relación de intervalo de inspecciones. La frecuencia de inspección (f), se expresa en inspecciones por año.

Luego de haber establecido el marco teórico adecuado para el desarrollo de la investigación, a continuación, en base a todo lo precedente, planteamos la siguiente hipótesis:

La implementación de Mantenimiento Preventivo basado en la Confiabilidad permitirá mejorar la Disponibilidad de equipos y maquinaria críticos en Línea de Molienda de la empresa minera Antamina Ancash.

Habida cuenta que hemos planteado nuestra hipótesis, abordaremos la determinación de los objetivos de la investigación:

El objetivo general para el desarrollo de nuestra investigación es proponer un plan de mantenimiento preventivo basado en la confiabilidad, en base a detección de fallas funcionales de los equipos y maquinarias críticas de línea de molienda de planta Antamina Ancash para aumentar su disponibilidad; y, para determinar lo aquí establecido, se han tenido en cuenta los siguientes *objetivos específicos*:

- Evaluar las condiciones actuales de mantenimiento de equipos y maquinarias del sector de molienda y principales indicadores, utilizando técnicas de mantenimiento.
- Identificar equipos críticos y determinar las pérdidas económicas por fallas en equipos y maquinarias.
- Determinar técnicas predictivas adecuadas para implementar el sistema de mantenimiento en los equipos y maquinarias críticas seleccionados.
- Elaborar un Plan de Mantenimiento basado en la confiabilidad, utilizando técnicas y métodos para reducir fallas identificadas.
- Estimar los indicadores de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad después del proceso de mejora y sustentar los costos-beneficio y recuperación de la inversión.

En razón que la tesis está dentro del marco de Mantenimiento, procedemos a justificar nuestro tema desde el punto de vista *técnico*, como la contribución al mejoramiento del nivel de operatividad y mantenibilidad de los equipos y maquinaria de línea de molienda en la Planta Antamina-Ancash; desde el punto de vista *económico*, si se logra aumentar la confiabilidad y disponibilidad de la maquinaria y equipos, se tendrá mayor capacidad de producción y menos pérdidas por reducción de producción debido a fallas, por lo tanto el ingreso económico será mucho mejor; desde el punto de vista *laboral*, al implementar el mantenimiento basado en la Confiabilidad se tendrá un mejor trabajo en equipo, sentando las bases para, en un futuro cercano, implementar el Mantenimiento Productivo Total, el clima laboral mejorará pues se tendrá mayor capacitación y trabajo de campo, avalando los aportes de los operarios de producción y mantenimiento. Permitirá establecer programas de capacitación laboral adecuados a los nuevos métodos y tecnologías; y, desde el punto de vista *tecnológico*, permitirá adquirir tecnología moderna de análisis de fallas que definirán el estado de los equipos, en los casos que se justifiquen se hará renovación de equipos por otros con tecnología mejorada.

II. MÉTODO

2.1 Tipo y diseño de investigación.

“Una investigación aplicada o también denominada tecnológica, se enfoca principalmente en brindar soluciones en beneficio de la sociedad, dado ello, este tipo de investigación permite utilizar conocimientos científicos para resolver problemas de producción en la industria” (Ortiz, 2008).

Por lo tanto, dentro de lo citado, nuestra investigación es de tipo aplicada puesto que, a partir de datos iniciales, conocimiento de la problemática de la empresa y aplicación de conocimientos científicos, se debe llegar a una solución dentro del sistema de maquinaria en la línea de molienda de la Empresa Minera Antamina – Ancash.

Adicionalmente, para nuestro estudio, se estará considerando un diseño de investigación de tipo no experimental, longitudinal de tendencia; no experimental, por cuanto ésta se realiza sin manipular deliberadamente variables, sino observar fenómenos tal y como se dan en su contexto universal, para después analizarlos. (Kerlinger, 1979); y longitudinal de tendencia, por cuanto se analizan cambios a través del tiempo (en variables o sus relaciones) dentro de una población en general; para nuestro caso, la maquinaria de la línea de molienda de la empresa Minera Antamina-Ancash.

2.2 Operacionalización de variables.

Tabla 2: Operacionalización de variables

Fuente: Elaboración propia

| Variable | Definición conceptual | Definición Operacional | Indicadores | Rango |
|--------------------|---|---|-------------|-------|
| Disponibilidad | Es la probabilidad que un activo pueda entrar en servicio en un período de tiempo dado | Es la relación entre el tiempo neto de operación de un molino y el tiempo calendaric | % | 0-100 |
| Confiabilidad | Es la probabilidad que un activo continúe en operación en un tiempo dado | Es el exponente del producto negativo de la tasa de fallas por el período de evaluación de un molino. | % | 0-100 |
| Mantenibilidad | Es la probabilidad que un activo pueda ser reparado en un período de tiempo dado | Es la resta de la mantenibilidad total menos el exponente del producto negativo de la tasa de reparación por el periodo de evaluación para un molino. | % | 0-100 |
| Vibración mecánica | Es la oscilación en relación al punto de equilibrio, con una cierta velocidad y frecuencia, cuando existe una desviación del centro de masa y del centro geométrico | Es la raíz cuadrada de la relación entre el módulo de elasticidad del material y del momento de inercia, entre el desplazamiento. | mm/s | 0-100 |
| Temperatura | Es la cantidad de calor que posee un cuerpo, que tiene un cierto calor específico y tiene una masa definida. Sensación auditiva inarticulada generalmente desagradable | Es la relación entre el calor, en Kj. y el producto del calor específico, en Kj/(Kg*°C)y la masa en Kg. | °C | 0-100 |

| | | | | |
|--------------------------|--|--|-----|--------|
| Ruido | Sensación auditiva inarticulada, generalmente desagradable. | El ruido es una señal no deseada pero el término se usa generalmente para indicar una señal aleatoria de un equipo. | db | 0-200 |
| Mantenimiento preventivo | calibración, que deben llevarse a cabo en forma periódica en base a un plan establecido. | Es el destinado a la conservación de equipos o instalaciones mediante la relación de revisión y reparación que garanticen su buen funcionamiento y fiabilidad. | % | 0-100 |
| Costos | Valor monetario | Gasto económico lo cual simboliza la fabricación de un producto. | S/. | 0-1000 |

2.3 Población, muestra y muestreo:

“La población está comprendida por el grupo de elementos de los cuales se puede extraer información relevante para la investigación, todos ellos guardando relación entre sí respecto al fenómeno estudiado” (Quezada, 2010)

La población considerada para nuestra investigación, la constituye toda la maquinaria del sector de molienda de Planta Antamina – Ancash; la muestra está conformada por la maquinaria y equipo críticos de molienda de Planta Antamina-Ancash. Al haberse identificado la muestra para el estudio, el muestreo fue premeditado e identificando, puesto que la muestra es idéntica a la población, no es de aplicación el método de muestreo alguno.

2.4 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Las técnicas e instrumentos considerados para la recolección de datos de nuestra investigación fueron los siguientes:

Tabla 3: Técnicas e instrumentos de estudio

Fuente: Elaboración propia

| Técnica | Instrumento | Objeto | Objetivos |
|--------------------|------------------------------|---|---|
| Observación | Hoja de toma de datos | Procesos de ejecución y mantenimiento | Para conocer el sistema y los factores que determinan su duración, costos y rendimientos |
| Entrevistas | Hoja de entrevista | Personal de operación y mantenimiento | Para determinar problemas específicos de operación y mantenimiento, que permitan determinar con mayor precisión los fenómenos de desgaste |
| Encuestas | Hojas de encuestas | Personal ejecutivo y mantenimiento de operación | Para determinar la criticidad de equipos y seleccionar los equipos que serán sujetos de Técnicas Predictivas |
| Mediciones | cronómetros | Trabajos de mantenimiento | Para determinar desviaciones de tiempo estándar de mantenimiento |

2.5 Procedimiento.

- Se aplicarán métodos analíticos para realizar el diagnóstico del sistema de mantenimiento actual y proponer la mejora para implementar las técnicas predictivas que permitan tener un nuevo plan de mantenimiento preventivo y así aumentar la disponibilidad y confiabilidad de equipos críticos.
- Se calculará la disponibilidad y confiabilidad del equipo en función del Plan de Mantenimiento, de las horas programadas y de las horas muertas por falla. Se espera que con el nuevo plan de mantenimiento preventivo y predictivo al índice de disponibilidad aumente.
- Finalmente, se determinará el monto de inversión por la adquisición de equipos y accesorios para el nuevo sistema de mantenimiento y el beneficio económico que representa la mejora en la disponibilidad de equipos y maquinaria críticos en la línea de molienda de la empresa minera Antamina-Ancash y el período estimado de retorno de la inversión.

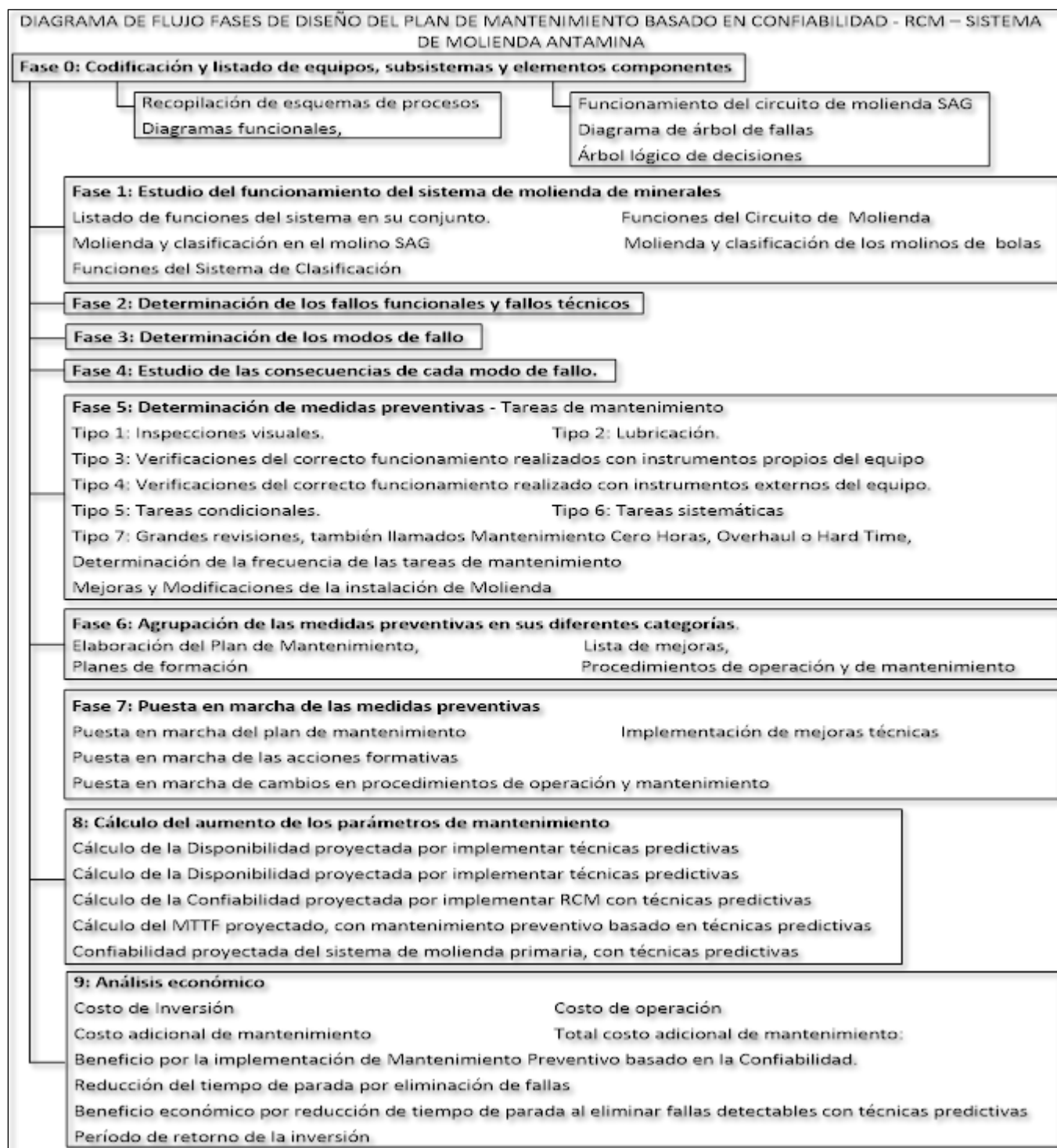


Figura 19: Diagrama de flujo del estudio.
Elaboración propia

2.6 Método de análisis de datos.

Para la implementación del mantenimiento preventivo en la línea de molienda de la empresa minera Antamina-Ancash, con el fin de mejorar la disponibilidad, el análisis de datos fue de tipo cuantitativo, para lo cual se desarrolló una base de datos en Excel. Con la información allí recolectada, se ha procesado a través de instrumentos prácticos, herramientas como diagramas, gráficos y tablas que fueron interpretadas.

2.7 Aspectos Éticos.

Este trabajo está basado en la normativa establecida en nuestro país y normas internacionales, el tesista encargado de esta investigación constata y declara que se ha cumplido con toda la normativa actual establecida en nuestro país, para que así se logre asegurar la confiabilidad y eficiencia del tema que se encuentra en su etapa de elaboración.

Además de ellos, esta investigación está hecha en base a las normas y parámetros establecidos por estas instituciones y además la normativa establecida por la Universidad Cesar Vallejo.

III. RESULTADOS

3.1 Evaluación de las condiciones actuales de mantenimiento de equipos y maquinarias del sector de molienda y principales indicadores, utilizando técnicas de mantenimiento.

La evaluación se hará para el equipo principal analizado, que es el molino SAG, puesto que se tiene datos más fidedignos para el activo mencionado.

Tabla 4: Datos y resultados de análisis del MTTR. Molino SAG, año 2017

Fuente: Elaboración propia

| MTTR para Molino SAG año 2017 | | | |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------------|
| Mes y año | MTTR (h/vez) | Nr. Fallas, Veces/mes | Tiempo perdido, h/mes |
| ene-17 | 2.07 | 7 | 14.50 |
| feb-17 | 2.08 | 6 | 12.50 |
| mar-17 | 1.44 | 9 | 13.00 |
| abr-17 | 1.46 | 12 | 17.50 |
| may-17 | 1.10 | 10 | 11.0 |
| jun-17 | 1.50 | 8 | 12.0 |
| jul-17 | 2.50 | 6 | 15.0 |
| ago-17 | 2.06 | 8 | 16.5 |
| sep-17 | 1.44 | 9 | 13.0 |
| oct-17 | 3.08 | 6 | 18.5 |
| nov-17 | 2.00 | 7 | 14.0 |
| dic-17 | 1.78 | 9 | 16.0 |
| Total, h/año | 1.79 | 97 | 173.50 |

Con los datos de la tabla N. 4:

$$\text{Tiempo promedio de reparación, MTTR} = \frac{\text{Tiempo perdido anual} \left(\frac{\text{h}}{\text{año}} \right)}{\text{Nr. de fallas mensual} \left(\frac{\text{veces}}{\text{año}} \right)}$$

$$\text{MTTR} = \frac{173.50 \left(\frac{\text{h}}{\text{año}} \right)}{97 \left(\frac{\text{veces}}{\text{año}} \right)} = 1.79 \frac{\text{h}}{\text{vez}}$$

Determinación del tiempo medio de operación, MTTF

Se tiene en cuenta los siguientes parámetros:

Tiempo calendario anual:

Nr. días del mes * 24 h/d * 12 meses/año = 8760 h/año

Tiempo programado de mantenimiento preventivo:

30 h/mes*12 meses/año = 576 h/año

Tiempo programado de producción:

Tiempo calendario – Tiempo Programado de Mantenimiento Preventivo (h/mes)

8760 – 576 = 8184 h/año

Tiempo neto de operación:

Tiempo programado de producción – Tiempo total de reparación (h/mes)

= 8,184 – 173.5 = 8,010.50 h/año

Tabla 5: Datos y resultados de análisis del MTTF molino SAG, año 2017

Fuente: Elaboración propia

| Equipo: molino SAG | | | | | | |
|--------------------|---------------------------------|---|---|---|--|--------------|
| Mes | Tiempo Calendario (h/mes) | = Tiempo de Mantenimiento Preventivo, h/mes | Tiempo Programado de Producción, h/mes | Tiempo neto de operación mensual, h/mes | Nr. Periodos de operación, Veces/mes | MTTF (h/vez) |
| Ene -17 | 744 | 48 | 696 | 681.50 | 7 | 97.36 |
| Feb -17 | 672 | 48 | 624 | 611.50 | 6 | 101.92 |
| Mar -17 | 744 | 48 | 696 | 683.00 | 9 | 75.89 |
| Abr -17 | 720 | 48 | 672 | 654.50 | 12 | 54.54 |
| May -17 | 744 | 48 | 696 | 685.00 | 10 | 68.50 |
| Jun -17 | 720 | 48 | 672 | 660.00 | 8 | 82.50 |
| Jul -17 | 744 | 48 | 696 | 681.00 | 6 | 113.50 |
| Ago -17 | 720 | 48 | 672 | 655.50 | 8 | 81.94 |
| Sep -17 | 744 | 48 | 696 | 683.00 | 9 | 75.89 |
| Oct -17 | 744 | 48 | 696 | 677.50 | 6 | 112.92 |
| Nov -17 | 720 | 48 | 672 | 658.00 | 7 | 94.00 |
| Dic -17 | 744 | 48 | 696 | 680.00 | 9 | 75.56 |
| | 8760 | 576 | 8184 | 8010.50 | 97 | 82.58 |

Con los datos de la tabla N. 5:

Tiempo promedio de Operación hasta la falla, MTTF

$$MTTF = \frac{\text{Tiempo Neto de Operación anual} \left(\frac{h}{\text{año}} \right)}{\text{Nr. de Períodos de Operación anual} \left(\frac{\text{veces}}{\text{año}} \right)}$$

$$MTTF = \frac{8010.50 \left(\frac{h}{\text{año}} \right)}{97 \left(\frac{\text{veces}}{\text{año}} \right)} = 82.58 \frac{h}{\text{vez}}$$

- Se observa que el tiempo promedio de operación del molino hasta la falla es de solamente 82.58 h/vez, mucho menor que el intervalo de operación hasta el día de mantenimiento

Determinación de la Disponibilidad anual del molino SAG

Tabla 6: Cálculo de disponibilidad anual del molino SAG:

Fuente: *Elaboración propia*

| | |
|--------|--------|
| ene-17 | 97.92% |
| feb-17 | 98.00% |
| mar-17 | 98.13% |
| abr-17 | 97.40% |
| may-17 | 98.42% |
| jun-17 | 98.21% |
| jul-17 | 97.84% |
| ago-17 | 97.54% |
| sep-17 | 98.13% |
| oct-17 | 97.34% |
| nov-17 | 97.92% |
| dic-17 | 97.70% |
| | 97.88% |

$$D_{\text{anual-Molino}} = \frac{\text{Tiempo neto de Operación anual} \left(\frac{h}{\text{año}} \right)}{\text{Tiempo Programado de Operación} \left(\frac{h}{\text{año}} \right)} * 100 =$$

$$D_{\text{anual-Molino}} = \frac{8,010.5 \left(\frac{h}{\text{año}} \right)}{8,184 \left(\frac{h}{\text{año}} \right)} * 100 = 97.88 \%$$

Cálculo de la Disponibilidad en función de los tiempos promedio de operación y de reparación

$$D_{\text{anual-Molino}} = \frac{MTTF \left(\frac{h}{\text{año}} \right)}{(MTTF + MTTR) \left(\frac{h}{\text{año}} \right)} * 100$$

$$D_{\text{anual-Molino}} = \frac{82.58 \left(\frac{h}{\text{año}} \right)}{(82.58 + 1.79) \left(\frac{h}{\text{año}} \right)} * 100$$

$$D_{\text{anual-Molino}} = 97.88\%$$

- Se observa que la Disponibilidad anual del molino SAG es de 97.88, menor a la esperada por la empresa, de 98.5% como mínimo.
- Indisponibilidad anual del molino SAG:
 $1 - 0.9788 = 0.0212 = 2.12\%$, mayor a la esperada, de 1.5% como máximo

Determinación de la confiabilidad del molino

Con los valores de la tabla N. 5:

$$\text{Tasa de falla, promedio anual: } \lambda = \frac{1}{MTTF}$$

$$\text{Tasa de falla, promedio anual: } \lambda = \frac{1}{82.58} = 0.0121 \frac{\text{Hrs}}{\text{falla}}$$

Confiabilidad promedio anual:

$$C_t = \left(e^{\frac{-\lambda * TTP}{100}} \right) * 100$$

$$C_t = \left(e^{\frac{-0.0121 * 8184}{100}} \right) * 100$$

$$C_t = 37.45\%$$

- Se observa que la Confiabilidad de operación del Molino es muy baja, solamente 37.45%, muy por debajo de la mínima esperada por Antamina, de 45%
- Inconfiabilidad del Molino SAG anual:
 $F = 1 - C_t = 1 - 0.3745 = 0.6255 = 62.55\%$, muy elevada

Cálculo de la mantenibilidad del molino SAG:

Con los valores de la Tabla N.2:

$$\text{Tasa de reparación, promedio anual: } \mu = \frac{1}{\text{MTTR}}$$

$$\text{Tasa de reparación, promedio anual: } \mu = \frac{1}{1.79}$$

$$\mu = 0.56 \frac{\text{reparaciones}}{\text{h}}$$

Mantenibilidad del Molino de bolas, anual:

$$M_t = \left(1 - e^{\frac{-\mu * \text{TTR}}{100}}\right) * 100$$

$$M_t = \left(1 - e^{\frac{-0.56 * 173.5}{100}}\right) * 100$$

$$M_t = 62.15\%$$

Determinación de las pérdidas económicas por fallas de equipos y maquinarias que ocasionan lucro cesante.

- Precio promedio del cobre: 5,303 \$/TM
- Fuente: <http://www.datosmacro.com/materias-primas/cobre>
- Lucro cesante por pérdida de producción debido a falla:
- Capacidad de procesamiento del molino de SAG:
 - ✓ 3804 a 4076 de mineral de cobre en t/h
 - ✓ Capacidad promedio del molino: 3940 TM/h
 - ✓ Cobre electrolítico recuperable: 2.2% en peso

Cobre electrolítico recuperable:

$$\text{Cu}_{\text{electrolítico-recuperable}} \left[\frac{\text{TM}}{\text{h}} \right] = m_{\text{Mineral-Cu}} \left(\frac{\text{TM}}{\text{h}} \right) * \% \text{ Recuperación}$$

$$\text{Cu}_{\text{electrolítico-recuperable}} \left[\frac{\text{TM}}{\text{h}} \right] = 3,940 \left(\frac{\text{TM}}{\text{h}} \right) * \frac{2.2}{100} = 78.8 \frac{\text{Mineral de Cu}}{\text{h}}$$

$$Cu_{\text{electrolítico-recuperable}} \left[\frac{\text{TM}}{\text{año}} \right] = Cu_{\text{electrolítico-recuperable}} \left[\frac{\text{TM}}{\text{h}} \right] * \text{Total horas parada} \left(\frac{\text{h}}{\text{año}} \right)$$

$$Cu_{\text{electrolítico-recuperable}} \left[\frac{\text{TM}}{\text{año}} \right] = 78.8 \left[\frac{\text{TM}}{\text{h}} \right] * 173.5 \left(\frac{\text{h}}{\text{año}} \right) = 13,671.8 \frac{\text{TM}}{\text{año}}$$

Lucro cesante

% de utilidad: 45%, dato de Planta:

$$LC \left[\frac{\text{NS}}{\text{año}} \right] = Cu_{\text{electrolítico-recuperable}} \left[\frac{\text{TM}}{\text{año}} \right] * \text{Precio Venta Cu} \left(\frac{\text{US\$}}{\text{TM}} \right) * \% \text{ utilidad}$$

$$LC \left[\frac{\text{NS}}{\text{año}} \right] = 13,671.8 \left[\frac{\text{TM}}{\text{año}} \right] * 5,303 \left(\frac{\text{USA \$}}{\text{TM}} \right) * 0.45 = 32'625,700 \frac{\text{US\$}}{\text{año}}$$

- Se observa que la pérdida económica, de 32'625,700 US\$/año es significativa.

Identificación de equipos críticos y determinación de las pérdidas económicas por fallas en equipos y maquinarias.

Se utilizará el método de matriz de criticidad y la hoja de cálculo de criticidad (Ver anexos N° 2 y 3)

a) Frecuencias de falla:

3 fallas/año,

CÁLCULO DE LA CRITICIDAD TOTAL

Consecuencia

$= (\text{Impacto Operacional} * \text{Flexibilidad Operacional})$

$+ \text{Costos Mantto} + \text{Impacto SAH}$

$\text{Consecuencia} = (6 * 4) + 2 + 4 = 30$

$\text{Criticidad Total} = \text{Frecuencia} * \text{Consecuencia} = 3 * 30 = \mathbf{90}$

Determinación del grado de criticidad en equipos, con hoja de cálculo de criticidad

Enfoque de criticidad: Se emplea la puntuación por cuatro factores de criticidad:

a) Factor de velocidad de manifestación de la falla: Ponderación: 25%

En período de probabilidad de falla, p-F

- a1) Muy corto, no da tiempo para detener la máquina
- a2) Corto, es posible detener la máquina
- a3) Suficiente, es posible programar la intervención

b) Factor de seguridad del personal y ambiente: Ponderación: 25%

- b1) Sin consecuencias
- b2) Efecto temporal sobre personas, no afecta el medio ambiente
- b3) Efecto temporal sobre las personas y el medio ambiente

c) Factor de costos de parada de Producción: Ponderación: 25%

- c1) No implica demora en la entrega
- c2) Implica demora de corto tiempo en la entrega
- c3) Implica demora y pérdida de clientes

d) Factor de costos de reparación: Ponderación: 25%

- d1) Más de 20,000 \$ por vez
- d2) Más de 10,000 \$ y menos de 20,000 \$ por vez
- d3) Menos de 10,000 \$ por vez

$$\begin{aligned} \textbf{Ponderación total: } & (0.25 * 1 * a1 + 0.25 * 0.5 * a2 + 0.25 * 0.2 * a3) + (0.25 \\ & * 0.1 * b1 + 0.25 * 0.3 * b2 + 0.25 * 0.6 * b3 + 0.25 * 0.8 * b4 \\ & + 0.25 * 1 * b5) + (0.25 * 0 * c1 + 0.25 * c2 * 0.6 + 0.25 * 1 * c3) \\ & + (0.25 * 1 * d1 + 0.25 * 0.5 * d2 + 0.25 * 0.1 * d3) \end{aligned}$$

Si sumatoria de puntuación es mayor o igual que 85: **CRÍTICO**

Si sumatoria de puntuación es menor o igual que 85 pero mayor o igual que 50:
SEMICRÍTICO

Si sumatoria de puntuación es menor que 50: **NO CRÍTICO**

Equipos seleccionados:

- Molino SAG
- Sistema de lubricación del molino
- Sistema de bombeo de pulpa bajo molinos

Participantes del análisis de criticidad:

- Operador de molino del área de molienda
- Técnico de mantenimiento
- Técnico de lubricación

Hoja de cálculo para análisis de criticidad.

Se utilizará la hoja de cálculo para el análisis de criticidad, con valores ponderados:

ANÁLISIS DE LA CRITICIDAD DE COMPONENTES DEL SISTEMA DE MOLIENDA DE MINERALES ANTAMINA FACTORES

De velocidad de manifestación de la falla
De seguridad del personal y ambiente
De costos de la parada de producción
De costos de reparación

25
25
25
25

INGRESAR LA PONDERACION PARA CADA CRITERIO
DEL FACTOR DE CRITICIDAD DEL EQUIPAMIENTO
(LA SUMA DEBE SER IGUAL A 100)
suma 100

Proceso de diagnóstico

INTRODUCIR EL VALOR 1 PARA CADA FACTOR EN LA CELDA QUE MEJOR DESCRIBA LA CONSECUENCIA

| Factores Equipamentos | Factor de velocidad de manifestación de la falla | | | Factor de seguridad del personal y ambiente | | | | | Factor de costos de la parada de producción | | | Factor de costos de reparación | |
|--|--|--------------------------------------|--|---|---|---|--|---|---|--|--------------------------------------|--------------------------------|--|
| | Período P-F | | | Descripción | | | | | Criterio | | | Clasificación | |
| | Muy corto, no da tiempo para detener la máquina | Corto, es posible detener la máquina | Suficiente, es posible programar la intervención | Sin consecuencias | Efecto temporal sobre personas, no afecta el ambiente | Efecto temporal sobre las personas y ambiente | Efecto irreversible sobre las personas | Efecto irreversible sobre las personas y ambiente | No implica demora en la entrega | Implica demora de corto tiempo en la entrega | Implica demora y pérdida de clientes | MÁS DE 20,000 POR VEZ | MÁS DE 10,000 \$ Y MENOS DE 20000 \$ POR VEZ |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Sub sistema mecánico externo del Molino | 1 | | | | | | | 1 | | | 1 | 1 | |
| Sub sistema mecánico interno del molino | 1 | | | | | | | 1 | 1 | | | 1 | |
| Sist. Lubricación | 1 | | | | | | | 1 | | | 1 | | 1 |
| Sistema mecánico de bombeo de pupa bajo molinos | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | 1 | |
| Informe para el análisis de la criticidad de los equipamientos | | | | | | | | | | | | | |
| Criticidad de los equipamientos : | | | | | | | | | | | | | |
| COMPONENTE | | | | | | | | | | Valor | Criticidad | | |
| Sub sistema mecánico externo del Molino | | | | | | | | | | 100.0 | CRITICO | | |
| Sub sistema mecánico interno del molino | | | | | | | | | | 90.0 | CRITICO | | |
| Sistema de Lubricación | | | | | | | | | | 87.5 | CRITICO | | |
| Sistema mecánico de bombeo de pulpa bajo molinos | | | | | | | | | | 87.5 | CRITICO | | |

Figura 20: Análisis de criticidad de componentes de sistema de molienda – Antamina

Fuente: Minera Antamina-Ancash

Entonces, a los sistemas mecánico externo e interno del molino, lubricación y de bombeo de pulpa bajo molino se les aplicará técnicas predictivas para detectar en su fase inicial a los fenómenos de desgaste y programar las medidas necesarias en el mantenimiento preventivo.

Tabla 7: Técnicas predictivas a aplicar en sistema mecánico externo e interno del molino

Fuente: Elaboración propia

| COMPONENTES AUXILIARES (FUERA DEL MOLINO) | | TÉCNICA PREDICTIVA |
|---|--|---|
| Sistema de lubricación y levante de los cojinetes tipo pads | circuito de acondicionamiento del aceite | análisis de aceite, vibración, monitoreo de temperatura, alineamiento |
| | circuito de alta presión | análisis de aceite, vibración, monitoreo de temperatura, alineamiento |
| sistema de lubricación y levante de emergencia | circuito run down | análisis de aceite, vibración, monitoreo de temperatura, alineamiento |
| Sistema de lubricación de sellos de los descansos (sistema engrase) | sello trilabio lado alimentación | |
| Feed chute molino | descarga | |
| mando del molino (sistema freno) | revestimientos del chute | ultrasonido, medición de desgaste, revestimiento |
| | freno lado norte | análisis de aceite |
| | freno lado sur | análisis de aceite |
| pernos críticos | pernos entre coraza y tapas del molino | medición de elongación perno por ultrasonido |
| | pernos entre coraza | medición de elongación perno por ultrasonido |
| | pernos entre coraza y corona | medición de elongación perno por ultrasonido |
| coraza | coraza lado alimentación | |
| | coraza lado shell | |
| | coraza lado descarga | |
| cabezal de descarga | trunnion | evaluación de defectos y discontinuidades por ultrasonido |
| | trommel adapter | |
| | cojinetes lado alimentación (LIFT PAD) | análisis de aceite, monitoreo de temperatura |
| cojinetes | cojinetes lado descarga (LIFT PAD) | análisis de aceite, monitoreo de temperatura |
| | cojinetes axiales (TRUSTH RAI EMPUJE) | análisis de aceite, monitoreo de temperatura |
| | jaula del trommel | |
| salida del molino | cañón del trommel | |
| | spider (soportes del cañón) | |
| | blindaje | |
| | mallas del trommel | medición de desgaste de espesores de malla |
| COMPONENTES INTERNOS (DENTRO DEL MOLINO) | | TECNICA PREDICTIVA |
| revestimiento del molino cabezales (se adjunta plano anexo) | placas del cabezal de entrada | medición de espesores de liner por UT |
| | anillo de levantamiento (alimentación) | medición de espesores de liner por UT |
| | placas de blindaje (shell) | medición de espesores de liner por UT |

| | | |
|--------------------|--|---------------------------------------|
| | | medición de perfil SHELL ALTO/BAJO |
| | levantadores de pulpa | medición de espesores de liner por UT |
| | placas de cabezal de salida | medición de espesores de liner por UT |
| | placas de muñon de salida | medición de espesores de liner por UT |
| pernos de sujeción | sujeción de revestimiento (ALIMENTACIÓN, SHELL Y DESCARGA) | |

Factor de costos de reparación

Clasificación de acuerdo con Pareto:

Permite determinar criterios de clasificación de las fallas de acuerdo con los costos directos de reparación. La escala usada es: clasificación A: equipamiento que pertenece al grupo responsable por el 80% clasificación B: equipamiento que pertenece al grupo responsable por el 15% clasificación C: equipamiento que pertenece al grupo correspondiente al 5%..

Se concluye que los siguientes subsistemas son críticos:

- Sub sistema mecánico externo del Molino
- Sub sistema mecánico interno del Molino
- El sistema de bombeo de pulpa bajo molino
- El Sistema de lubricación

Entonces se le aplicarán técnicas predictivas

Tabla 8: Técnicas predictivas que aplicar en sistema de bombeo de pulpa bajo molinos

Fuente: Elaboración propia

| Técnica Predictiva | Equipo | Instrumento |
|---|---|--------------------------------|
| Medición de vibraciones | En motor eléctrico de bomba | Vibrómetro |
| | En botella porta rodamiento de bomba | |
| Análisis de distribución de calor | En rodamientos de motor eléctrico botella porta rodamiento de bomba | Cámara termográfica |
| Análisis de viscosidad del aceite | En cojinetes principales de motor eléctrico | Viscosímetro |
| Detección del desalineamiento de ejes y acoplamientos | Entre ejes y acoplamiento del motor eléctrico y bomba | Alineador computarizado Lasser |

Determinación de técnicas predictivas adecuadas para implementar el sistema de mantenimiento en equipos y maquinarias críticas seleccionados.

Puntos de medición

Existen dos puntos para medir el nivel de vibración:

- En los descansos, en los que la máquina se apoya.
- En los puntos de unión con la bancada o cimentación

Es importante realizar la medida en los tres ejes del espacio: en las direcciones radiales (horizontal y vertical) y en la dirección axial.

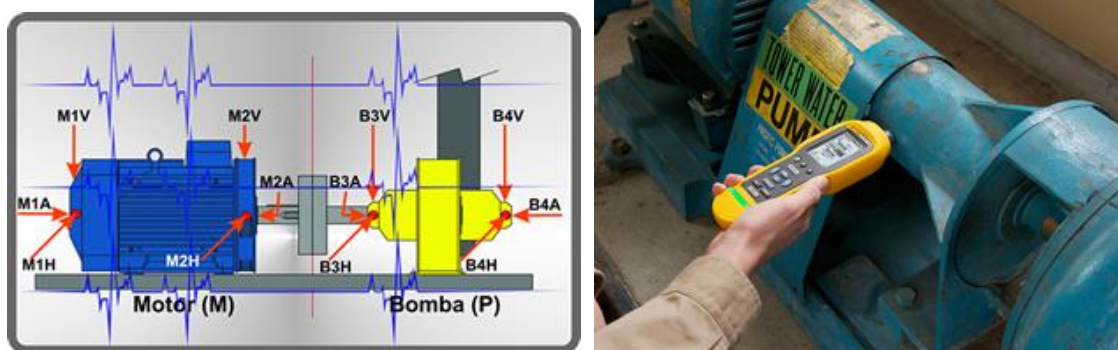


Figura 21: Puntos de análisis de vibraciones en motor.

Fuente: www.reliabilityservices.net

En el caso del motor eléctrico WEG, que acciona la bomba de agua a molino principal, se tendrán los siguientes puntos de medida:

En cojinetes:

- Dos mediciones, en cojinetes de rodamientos, en modo radial horizontal
- Dos mediciones en cojinetes de rodamientos en el plano radial vertical
- Dos mediciones en cojinetes de rodamientos en el plano axial

En puntos de unión con la cimentación

- Cuatro mediciones en el plano horizontal, una por cada unión
- Cuatro mediciones en el plano vertical, una por cada unión
- Cuatro mediciones en el plano axial, una por cada unión

Total, mediciones de vibraciones en el motor eléctrico:

$$2 + 2 + 2 + 4 + 4 + 4 = 18 \text{ puntos de medición de vibraciones}$$

Análisis de durabilidad de rodamientos de bomba de agua a Molino de minerales

En el caso de la bomba de agua al molino de minerales, está equipado con rodamientos rígidos de bolas SKF serie 6810

Los rodamientos son cambiados cuando las vibraciones son elevadas, que obligan a reducir su velocidad de rotación, por medio de un variador de velocidad, hasta en un 15%, lo cual reduce la capacidad de bombeo, y de procesamiento de minerales; por este motivo ha sido considerado como equipo crítico por el personal de Planta de Molinos de minerales de Antamina.

El cambio de rodamientos se hace, en promedio cada 10 meses, lo que se considera un lapso bajo de tiempo.

Cálculo de durabilidad de rodamientos teórica, sin vibraciones:

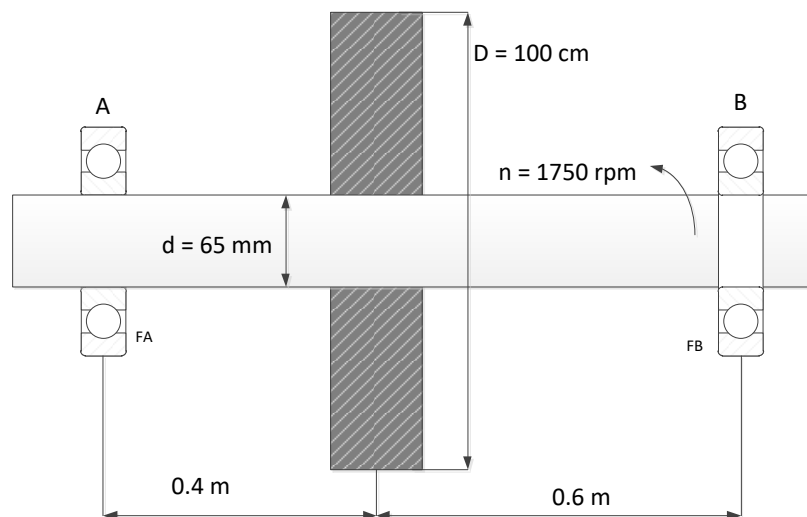


Figura 22: Montaje de rodamientos y rotor en bomba de agua al molino principal

Fuente: Planta de molinos de minerales Antamina

Velocidad angular del eje y rodamientos:

$$\omega = \frac{\pi * n}{30} = \frac{\pi * 1750}{30} = 183.26 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Potencia transmitida por la bomba:

$$75 \text{ kw} = 75,000 \text{ w}$$

Momento de torsión transmitido por el rotor de la bomba:

$$P = M_t * \omega \rightarrow M_t = \frac{75,000 \text{ w}}{183.26 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 409.25 \text{ N} * \text{m}$$

De la ecuación del momento de torsión: $M_t = F_p * r$

Se determina la fuerza periférica equivalente en el rotor de la bomba:

$$M_t = F_p * r \rightarrow F_p = \frac{409.25 \text{ N} * \text{m}}{0.50 \text{ m}} = 818.51 \text{ N} = 81.85 \text{ daN}$$

Fuerzas de reacción en cojinetes del eje de la bomba:

- $F_A * 1\text{m} = 81.85 \text{ daN} * 0.6 \text{ m} \rightarrow F_A = 49.11 \text{ daN}$
- $F_B * 1\text{m} = 81.85 \text{ daN} * 0.4\text{m} \rightarrow F_B = 32.74 \text{ daN}$

Número de ciclos de los rodamientos:

$$L_{h-A} = \left(\frac{C}{F_A} \right)^3 * \frac{10^6}{60 * n} = \left(\frac{660}{49.11} \right)^3 * \frac{10^6}{60 * 1750} = 23,117 \text{ h}$$

$$L_{h-B} = \left(\frac{C}{F_B} \right)^3 * \frac{10^6}{60 * n} = \left(\frac{660}{32.74} \right)^3 * \frac{10^6}{60 * 1750} = 55,000 \text{ h}$$

En la cual,

C = capacidad dinámica de carga del rodamiento. En el caso del rodamiento serie, su valor es 660 daN = 6,600 N.

Se observa que, los rodamientos deben ser cambiados cada 23,117 h, en operación continua normal, pero, debido a que trabaja en régimen vibracional, se cambian cada 7,200 h, solamente, causando pérdidas de producción por reducción de capacidad y por parada por cambio de rodamientos.

Por lo observado, se justifica la inclusión de este equipo en la lista de equipos críticos, al que se le aplicarán técnicas predictivas de medición de vibraciones, así como corrección de vibraciones con balanceo dinámico

Análisis de lubricantes

Análisis de aceites

El análisis de aceites es una técnica predictiva que ofrece valiosa información que ayuda a determinar cuándo se debe intervenir una máquina y se diagnostica el fallo detectado.

Las técnicas de análisis de aceites lubricantes son fundamentales para determinar:

Desgaste de componentes de la máquina.

El estudio de los componentes de desgaste férricos y no férricos permite localizar con la mayor antelación el desgaste de cojinetes, rodamientos, engranajes, obturaciones y otros componentes.

Parámetros del aceite que se pueden medir

Los objetivos a obtener por aplicar el análisis de aceites como técnica predictiva son:

- Maximizar la **duración** de los aceites lubricantes al programar su sustitución solamente cuando sea realmente necesario.
- **Prevenir averías** por deterioro del lubricante antes de lo esperado, por la identificación de partículas de desgaste de los componentes de la máquina monitorizada o por contaminación.
- Información más precisa para **planificar** las **revisiones** de mantenimiento de la maquinaria.



Figura 23: Equipo para análisis de aceites en taller Oilview Quick Check

Fuente: <http://www.preditecnico.com/2013/03/el-analisis-de-aceites-como-tecnica.html>

Seleccionar la tecnología y métodos para reparar las fallas detectadas por las técnicas predictivas.

Medición de vibraciones por ondas de choque con medidores portátiles



Figura 24: Analizador de vibraciones

Fuente: www.Skf.com

Características y beneficios

- El diseño innovador del sensor contribuye a minimizar las variaciones de las medidas causadas por el ángulo del instrumento y la presión ejercida
- Calidad de datos consistente tanto a alta como a baja frecuencia
- Medida de la temperatura con sensor de infrarrojos que aumenta la capacidad de diagnóstico
- La memoria integrada almacena hasta 3.500 mediciones.

| Sensor | |
|---|------------------------------------|
| Sensibilidad | 100 mV / g \pm 10% |
| Rango de medida | De 0,01 a 50 g |
| Rango de baja frecuencia (medi global) | De 10 a 1.000 Hz |
| Rango de alta frecuencia | De 4.000 a 20.000 Hz |
| Resolución | 0,01 g |
| Precisión | A 100 Hz \pm 5% del valor medido |

| Sensor externo | |
|---|----------------------------|
| Nota: Fluke admite sensores externos, pero no los suministra | |
| Rango de frecuencia | De 10 a 1.000 Hz |
| Tensión de polarización (para suministrar energía) | De 20 a 22 V cc |
| Corriente de polarización (para suministrar energía) | Máximo 5 mA |

| Firmware | |
|----------------------------|--|
| Interfaces externas | Comunicación por USB 2.0 (velocidad total) |
| Capacidad de datos | Base de datos en la memoria flash interna |
| Actualización | A través de USB |

| Emisión irradiada | |
|---|--|
| Descarga electrostática: explosión | Norma EN 61000-4-2 |
| Interferencia electromagnética | Norma EN 61000-4-3 |
| RE | Norma CISPR 11, Clase A |
| Medioambiental | |
| Temperatura de trabajo | De 20 a 50 °C (-4 °F a 122 °F) |
| Temperatura de almacenamiento | De -30 a 80 °C (-22 °F a 176 °F) |
| Humedad de funcionamiento | De 10 % a 95 % HR (sin condensación) |
| Altitud de funcionamiento/almacenamiento | Del nivel del mar a 3.048 metros (10.000 pies) |
| Clasificación IP | IP54 |
| Límite de vibración | Pico de 500g |
| Prueba de caída | 1 metro |

Medición de temperatura con cámara termográfica

Cámara de termográfica PCE-TC 30



Figura 25: Cámara termográfica

Fuente: <https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/camara-termografica-pce-instruments-camara-de-termografica-pce-tc-30-det-1773008.htm?list=kat&listpos=1>

| | |
|------------------------------------|---|
| Acumulador intercambiable | - Resolución del sensor de 80 x 80 |
| - Duración del acumulador: 4 horas | - Rango de medición hasta 250 °C |
| - Pantalla LCD de 3,5 " | Incluye Micro-USB para transferencia de datos |
| Especificaciones técnicas | |
| Resolución del sensor | 80 x 80 Píxeles |
| Rango de medición | 0 ... +250 °C |
| Funciones de análisis | Medición de temperatura puntual |
| | Medición de temperatura superficial (<u>T_{máx}</u> / <u>T_{mín}</u>) |
| | Función HOLD (<u>T_{máx}</u> / <u>T_{mín}</u>) |
| Pantalla | LCD de 320 x 240 píxeles |
| Sensibilidad térmica | 80 <u>mk</u> |
| Objetivo | 8 mm |
| Zoom digital | 3 x |
| Campo visual | 18,5 x 18,5 " |
| Frecuencia | 50 Hz |
| Temperatura de trabajo | 0 ... +50 °C |
| Interfaz | Micro-USB |
| Parámetro de medición | Valor de emisividad ajustable |
| Alimentación | Acumulador intercambiable |
| Duración del acumulador | Aprox. 4 horas |
| Dimensiones | 103 x 98 x 258 mm |
| Peso | 755 g |
| Clase de protección | IP43 |

Análisis de aceite con analizadores electroquímicos de aceite

Controlador de la condición del aceite

Detecta cambios en la condición del aceite



Figura 26: analizador de aceite SKF TMEH 1

Fuente: Analizadores SKF

Es un instrumento portátil que muestra información inmediata sobre la condición del aceite y evita, en muchos casos, la necesidad de llevar a cabo largas investigaciones de laboratorio.

Ventajas:

- Es portátil y fácil de usar.
- La lectura numérica facilita el análisis de tendencia.
- Permite almacenar la calibración (aceite en buen estado) en su memoria.

Tabla 9: Datos técnicos lubricación

Fuente: Analizadores SKF

| Datos técnicos | |
|---------------------------|--|
| Tipos de aceite adecuados | Aceites minerales y sintéticos |
| Repetibilidad | Mejor que 95% |
| Lectura | Gradación verde/roja + valor numérico (de -999 a 999) |
| Pilas | Alcalina de 9 V IEC 6LR61 |
| Autonomía | >150 horas o 3000 pruebas |
| Dimensiones | Instrumento: 250 x 95 x 32 mm (9,8 x 3,7 x 1,3 <u>pulg.</u>) Maletín de transporte: 530 x 85 x 180 mm (20,9 x 3,4 7,0 <u>pulg.</u>) |
| Peso | Instrumento: 385 g (14 oz) Peso total en maletín de transporte: 1,2 kg (2,6 lb) |

Selección de la tecnología y métodos para reparar las fallas detectadas por las técnicas predictivas.

Selección de equipo para detectar y corregir desalineamientos



Figura 27: Alineador de ejes TKSA 41

Fuente: Analizadores alineamiento SKF

Selección de Máquina balanceadora dinámica horizontal Manek

La máquina sirve para determinar el nivel de desbalance dinámico de rotores y entrega los pesos y ubicación a ser colocados para anular el desbalance



Figura 28: Balanceador dinámico de rotores, computarizado
Fuente: *Maneklatexports.com*

- Maquinas con Rodamientos Suaves y Rodamientos Duros
- Indicador de Desequilibrio Análogo / Digital
- Indicador de Localización Stroboscopico / Digital

Tabla 10: Datos técnicos - Balanceo dinámico

Fuente: <http://www.maneklatexports.com/Espanol/McTools/DynamicBalance.htm>

| Modelo: | DB-1000 |
|--|-------------------|
| Tipo: | Rodamientos Duros |
| Accionamiento: | Axial o Por Banda |
| Peso de Trabajo (kg.): | 30 a 1000 |
| Diámetro Máximo (mm): | 1600 |
| Distancia de Centro entre Rodamientos (mm)*: | 1500 |
| Diámetro del Eje (mm): | 25 a 140 |
| Velocidad de Balancear (Nominal) (rpm): | 250 |
| <u>Sensitividad (gmm/kg.):</u> | 1 a 5 |
| Motor (HP): | 7.5 |

Elaboración de un Plan de Mantenimiento basado en la confiabilidad, utilizando técnicas y métodos para reducir fallas identificadas.

Tabla 11: Listado y codificación de equipos

Fuente: Elaboración propia

| Item | Denominación | Código |
|------|---|--------------|
| 1 | Sistema de arranque del motor principal de accionamiento | 310-MLS-0001 |
| 2 | Motor de accionamiento del molino de minerales | 301 – MI 002 |
| 3 | Molino principal de minerales | 310-MLS-001 |
| 4 | Faja alimentadora de minerales al molino | 240-CVB-0005 |
| 5 | Sistema de bombeo de lechada de cal | FV-01201A |
| 6 | Sistema de bombeo de agua al molino | FV-01202A |
| 7 | Sistema de medición del impacto en molino | 410 MD 001 |
| 8 | Sistema de lubricación del molino | 315-OLT-00 |
| 9 | Clasificador rotativo de mineral, Trommel | 415-MTL-001 |
| 10 | Sistema de bombeo de pulpa | 310-PPS-609 |
| 11 | Manifold distribuidor de pulpa de mineral | 310-STP-67 |
| 12 | Tanque colector de pulpa de mineral | 310-STP-661 |
| 13 | Sistema de bombeo de pulpa de mineral a clasificad centrífugas | 310-PPS-G1 |
| 14 | Separador centrífugo de mineral acabado | 310-CSC-00 |
| 15 | Molino de minerales recuperador | 310-MLB-001 |

Recopilación de esquemas de procesos

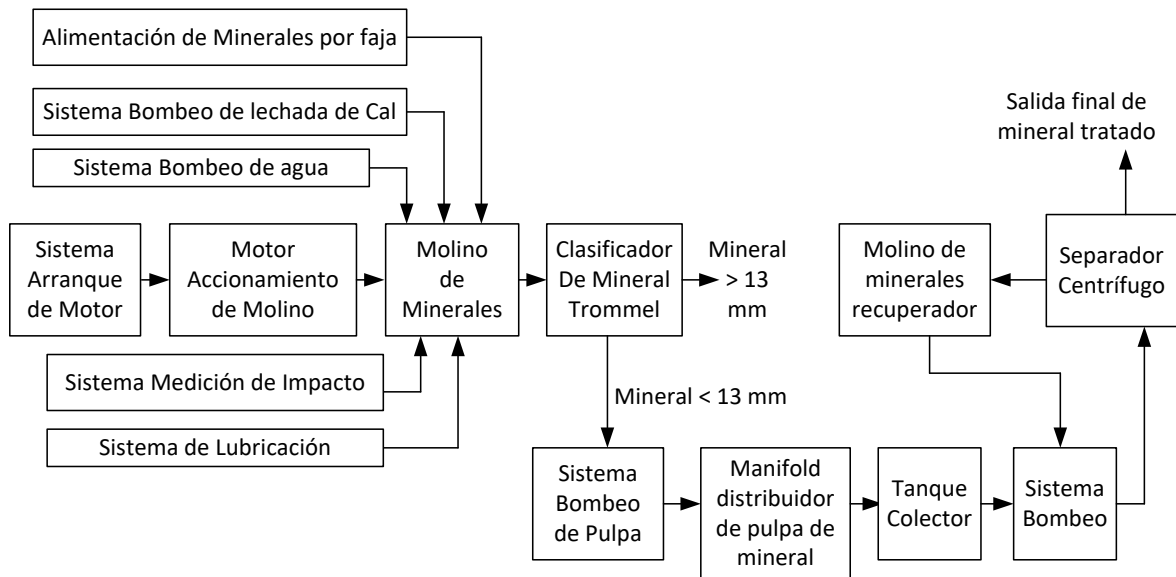


Figura 29: Esquemas de procesos

Fuente: Elaboración propia

Función del circuito de molienda

- Mineral fresco desde la ruma de gruesos (stock pile): 3804 a 4076 t/h.
El circuito de molienda SAG, cuenta con dos molinos SAG (310-MLS-0001@0002), el cual tiene las siguientes características:

Tabla 12: Especificaciones técnicas – Molino SAG

Fuente: Minera Antamina.

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS | |
|----------------------------------|--|
| Datos generales | |
| Número de TAG | 310-MLS-0001@0002 |
| Fabricante | FFE Minerals |
| Tipo | Molienda húmeda, descarga por rejillas ranuradas (slots) |
| Tamaño (Diámetro Largo) | 38 pies x 21 pies |
| Capacidad (diseño) | 4, 688 TPH |
| Carga de Bolas | 20% del volumen (máx.) |
| Carga de Mineral | 30% del volumen (máx.) |
| Velocidad de Giro | 9.04 RPM variable. |
| Pulpa de Alimentación | 80% pasante 150 mm |
| Apertura de Rejilla | 65 mm. |
| Diámetro de bolas | 5 pulgadas (127 mm) |
| Trommel | |
| Capacidad (diseño) | 5, 625 TPH |
| Oversize | 2, 801 TPM |
| Undersize | 3, 544 TPM |
| Apertura rejilla (Ancho Largo) | 13 mm x 50 mm |
| Agua de Lavado | 450 m ³ /h |

El mineral fresco que llega a la molienda SAG es para reducir el mineral a tamaños en que las partículas valiosas estarán libres de las impurezas, siendo el diámetro máximo de 7".

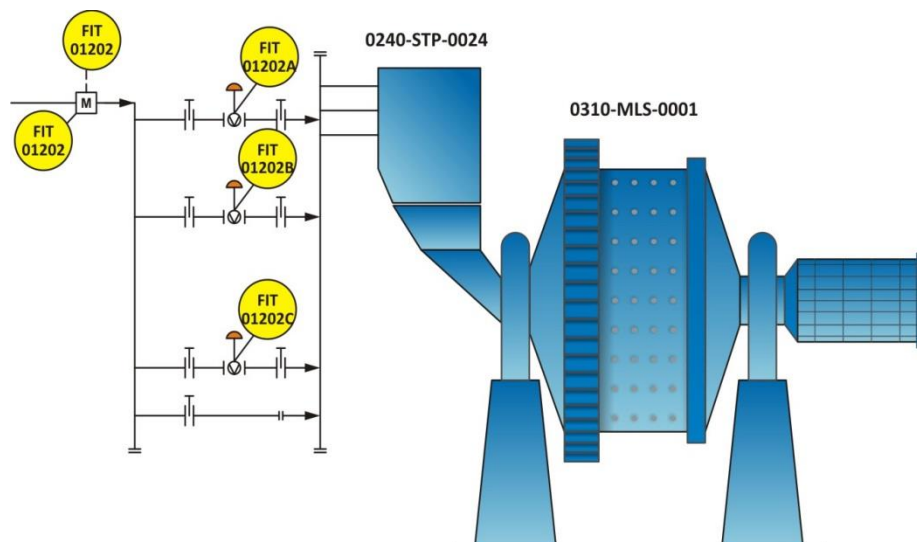


Figura 30: Ingreso de agua a Chute de alimentación del Molino SAG.
Fuente: Minera Antamina

El ingreso de lechada de cal, está controlada por dos válvulas de pistón neumáticas, las cuales de acuerdo al rango del tonelaje de mineral que ingresa al molino

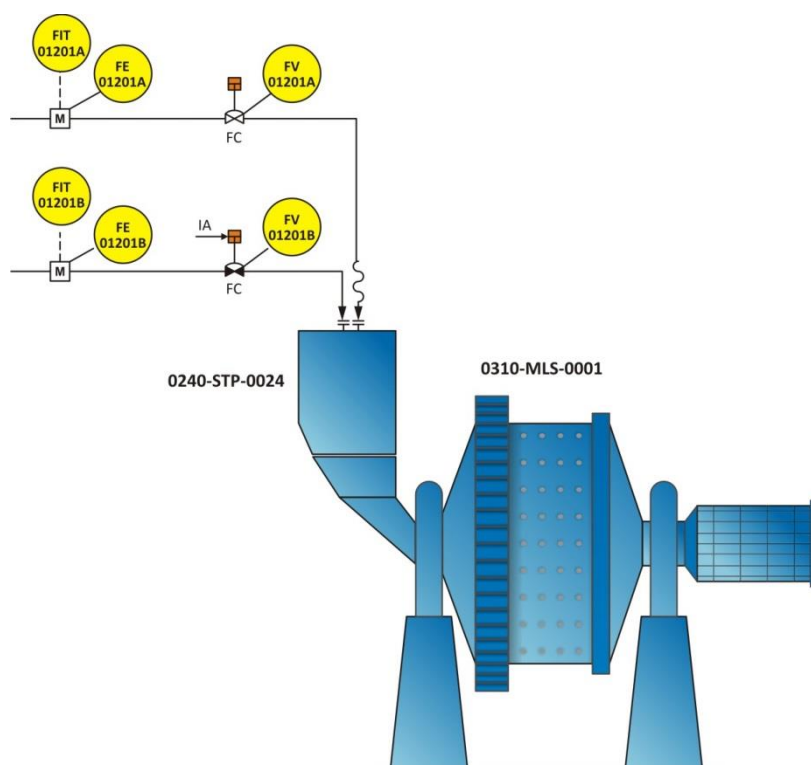


Figura 31: Ingreso de lechada de cal al chute de alimentación del Molino SAG.
Fuente: Minera Antamina

La carga de mineral fresco y material recirculante del circuito de chancado de pebbles que ingresa al Molino es fragmentada

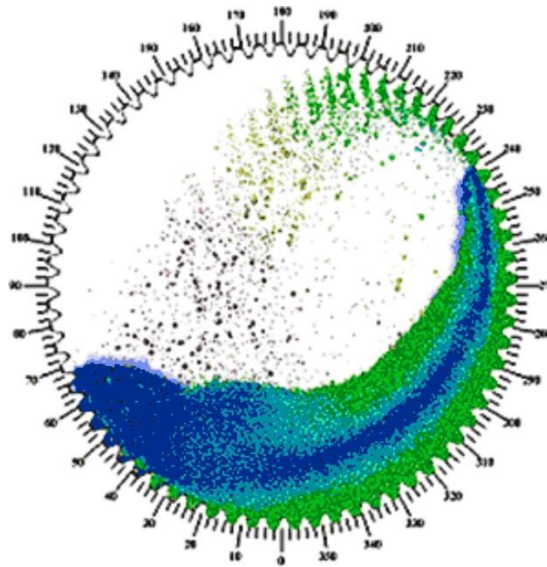


Figura 32: Movimiento del mineral al Interior del Molino SAG.

Fuente: Minera Antamina

La pulpa es retirada del molino SAG por la zona de descarga, unida a un trommel.



Figura 33: Imagen del Trommel del Molino SAG.

Fuente: Minera Antamina

El Trommel es un cilindro construido de material de uretano, el cual se encuentra ranurado a través de todo el cuerpo. Estas ranuras tienen una abertura aproximada de 13 x 50 mm de dimensión.

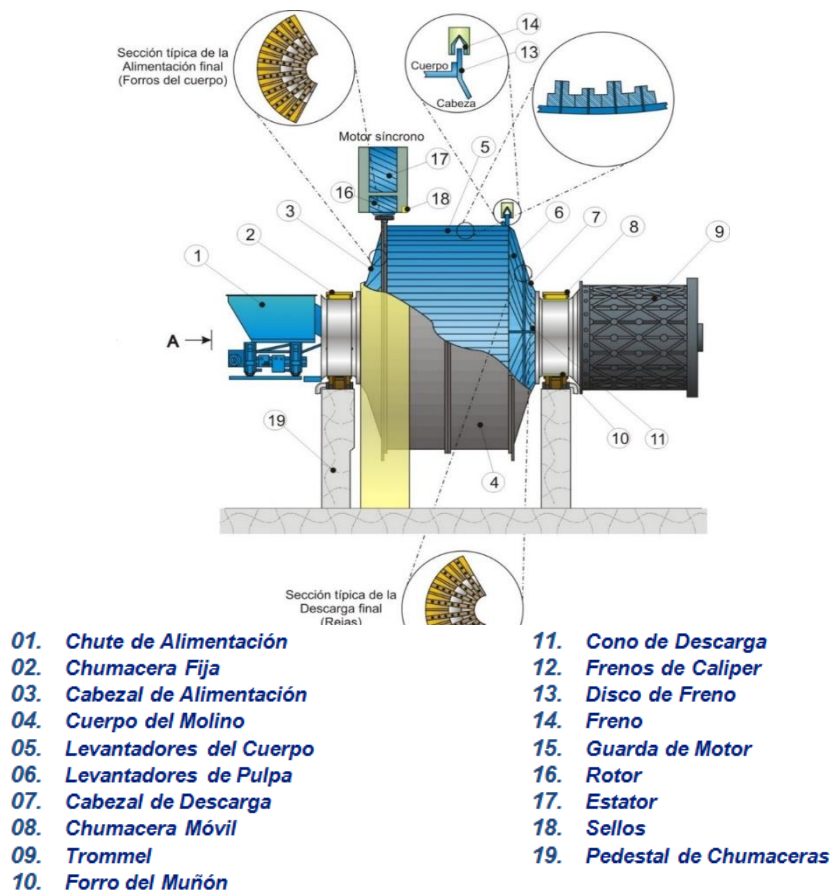


Figura 34: Partes internas del Molino SAG
 Fuente: Planta Antamina

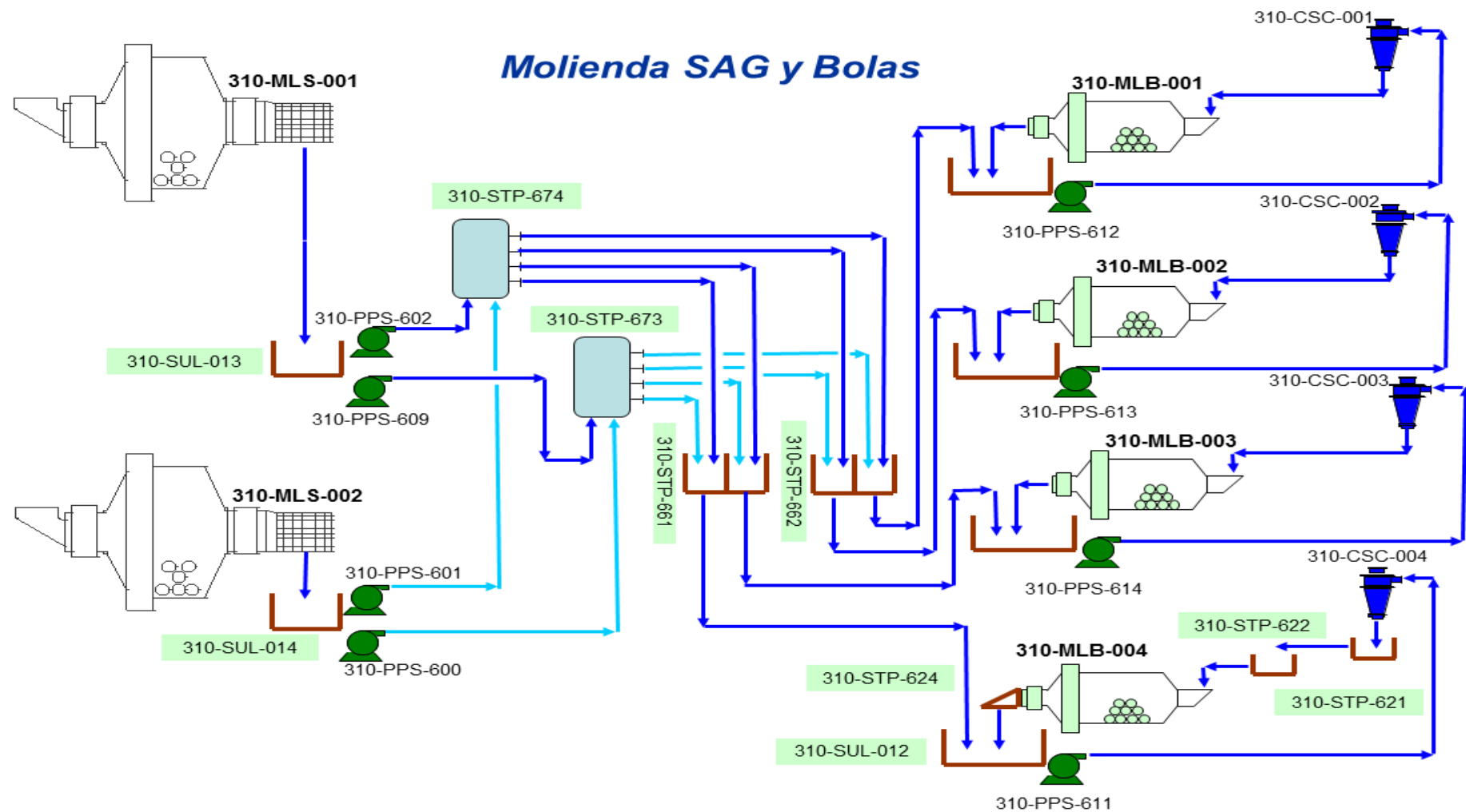


Figura 35: Diagrama general del proceso de molienda
Fuente: Elaboración propia

Diagramas funcionales,

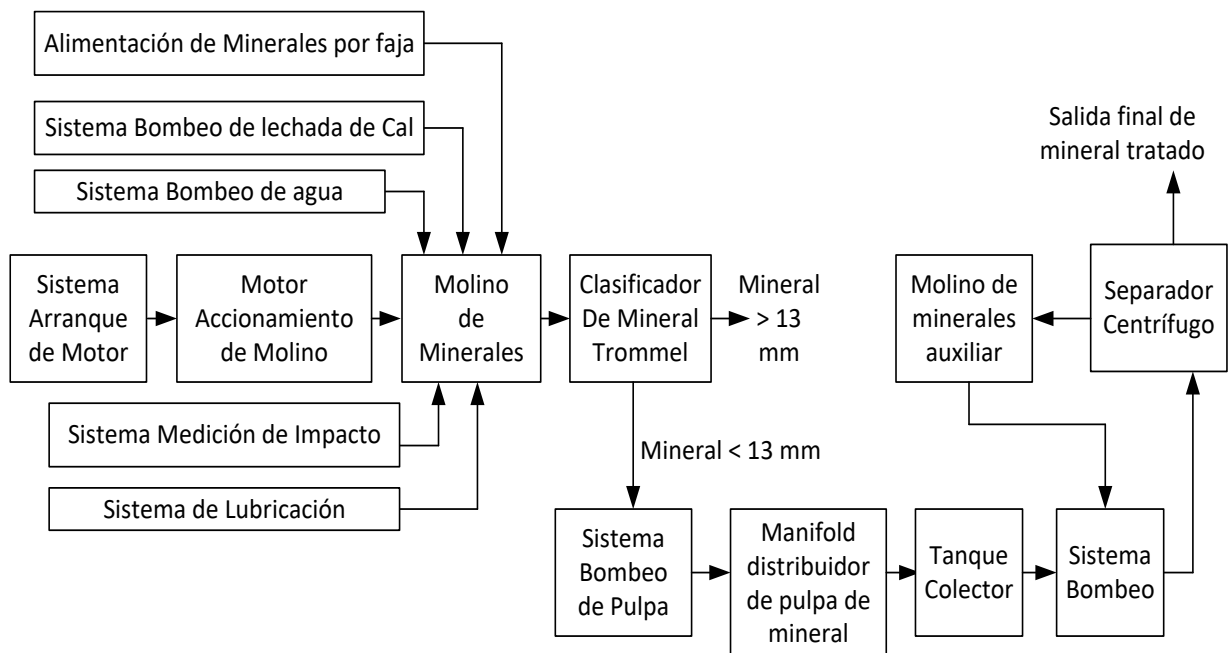


Figura 36: diagrama de proceso procesamiento de molienda de minerales

Fuente: Planta Antamina

Diagrama de árbol de fallas

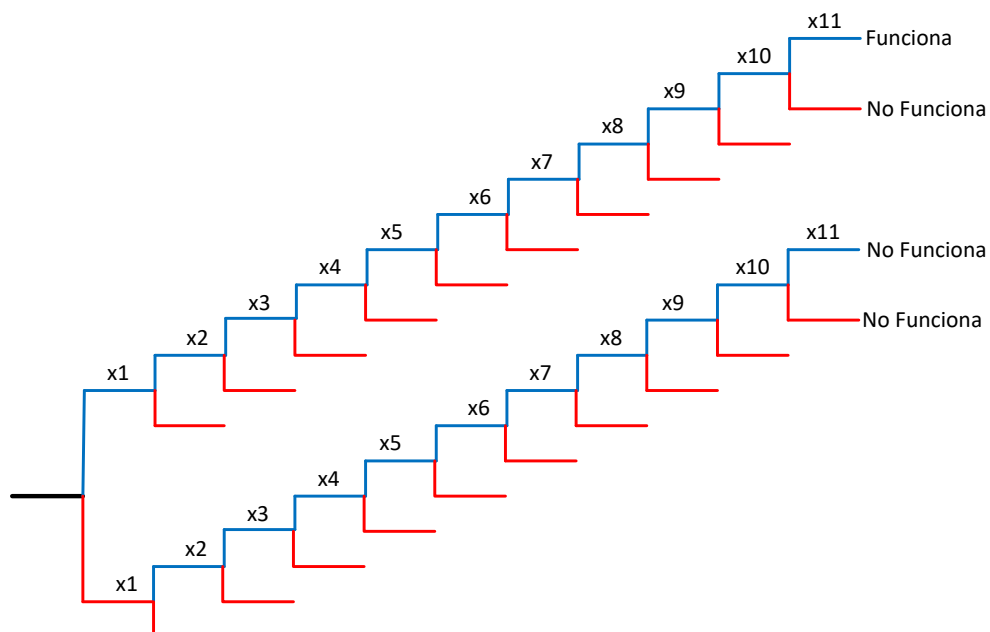


Figura 37: Diagrama de árbol de fallas del sistema de molinos

Fuente: Planta Antamina.

Árbol lógico de decisiones

Servirá para aplicar el enfoque de mantenimiento para atacar las causas de las fallas

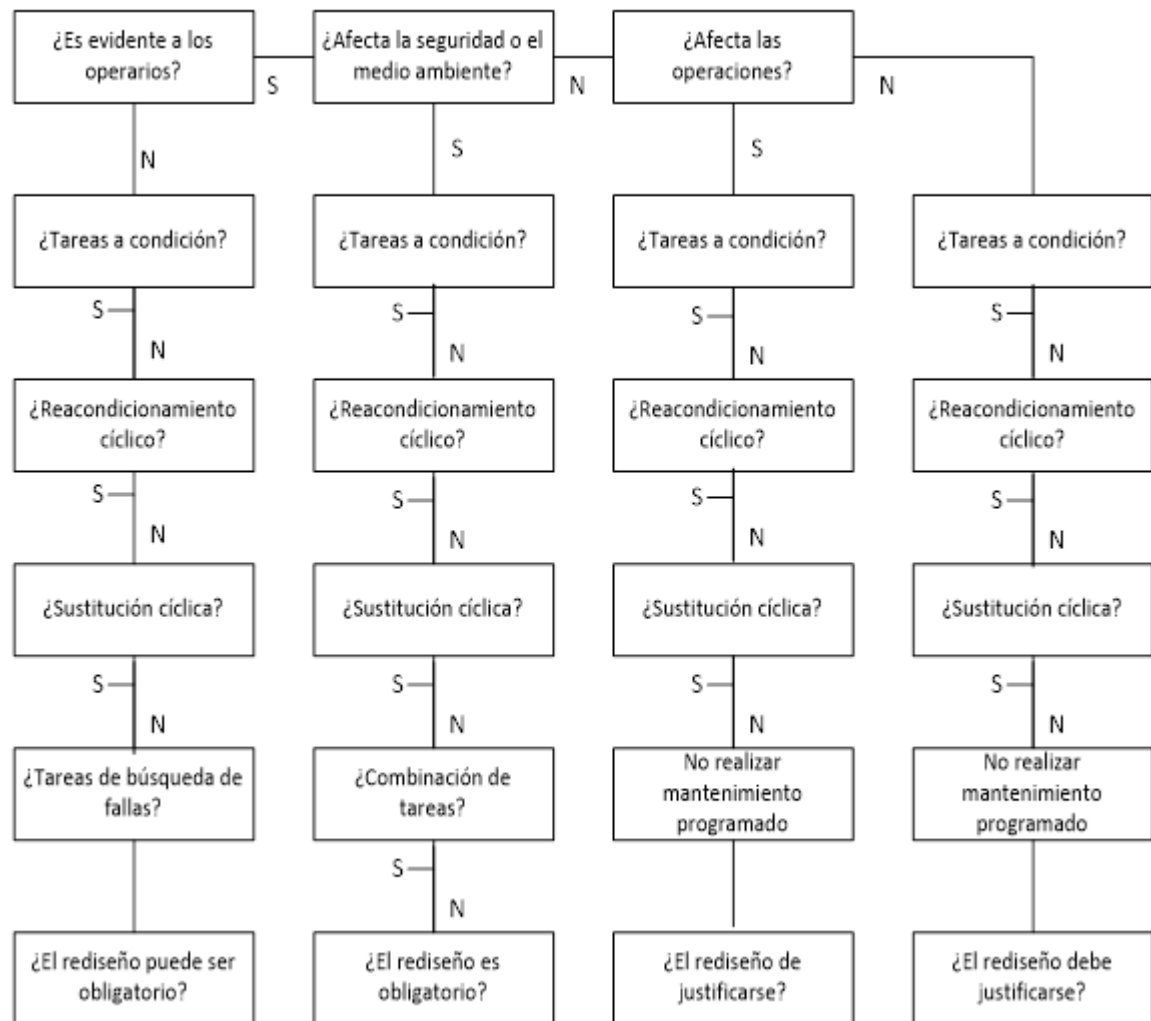


Figura 38: Árbol Lógico de Decisiones del MCC [9]

Fuente: Elaboración propia

- **Fase 1: Estudio del funcionamiento del sistema de molienda de minerales**

Se detallan las funciones del sistema de molienda, cuantificando como se lleva a cabo la función

Listado de funciones del sistema en su conjunto.

Tabla 13: Funciones de subsistemas y equipos significativos integrados en cada subsistema.

Fuente: Elaboración propia

| Ítem | Denominación | Código | Función |
|------|--|---------------|---|
| 1 | Sistema de arranque del motor principal de accionamiento | 310-MLS-0001 | Arranque lino del motor y control de velocidad |
| 2 | Motor eléctrico 24000 HP | 301 – MLS 002 | Accionamiento del molino principal de minerales |
| 3 | Molino principal de minerales | 310-MLS- 001 | Molienda de minerales, desde 1 pulgada hasta 17 mm |
| 4 | Faja alimentadora de minerales al molino | 240-CVB-0005 | Alimentación con minerales metálicos |
| 5 | Sistema de bombeo de lechada de cal | FV-01201A | Alimentación de lechada de cal, a una cierta presión y flujo |
| 6 | Sistema de bombeo de agua al molino | FV-01202A | Alimentación de agua industrial al molino a una cierta presión y flujo |
| 7 | Sistema de medición del impacto al molino | 410 MDC-001 | Medir el impacto de molienda de minerales y monitorear su magnitud |
| 8 | Sistema de lubricación del molino | 315-OLT-002 | Suministro de lubricante con cierta viscosidad, flujo y presión |
| 9 | Clasificador rotativo de minerales Trommel | 415-MTL-001 | Clasificar los minerales a la salida del molino, en dos clases: mayor a 17 mm menor a 17 mm |
| 10 | Sistema de bombeo de pulpa | 310-PPS-609 | Evacuar la pulpa de mineral del molino enviarla al siguiente proceso |
| 11 | Manifold distribuidor de pulpa de mineral | 310-STP-674 | Colecta la pulpa desde varios molinos distribuirla |
| 12 | Tanque colector de pulpa de mineral | 310-STP-661 | Almacenamiento y distribución de pulpa |
| 13 | Sistema de bombeo de pulpa de mineral a clasificador centrífugas | 310-PPS-G12 | Suministro de pulpa de mineral, a una cierta presión y flujo |
| 14 | Separador centrífugo de mineral acabado | 310-CSC-001 | Clasificador del producto final y retorno reproceso de mineral que no cumple especificación |
| 15 | Molino de minerales recuperador | 310-MLB-001 | Moler los minerales que no cumplen especificación de tamaño final |

En la concentradora se trata los siguientes tipos de mineral:

- **M-1: Cu bajo bismuto tiene molibdeno**
- **M-2: Cu alto bismuto no tiene molibdeno**
- **M-3: Cu-Zn bajo bismuto tiene molibdeno.**
- **M-4: Cu-Zn alto bismuto no tiene molibdeno.**
 - **M-5: Bornita bajo zinc**
 - **M-6: Bornita alto zinc.**

Funciones del Circuito de Molienda

Moler el mineral a un flujo constante para proporcionar una buena liberación y sea eficientemente separado aguas abajo en el circuito de flotación. Se debe obtener el tamaño de 80% pasante por 150 micrones para mineral de Cu y 100 micrones para mineral de Cu-Zn.

Molienda y clasificación en el molino SAG

Consideraciones metalúrgicas y operacionales:

Función del proceso de molienda de mineral:

Reducir el tamaño del mineral chancado en su preparación para el proceso de concentración por flotación selectiva, la parrilla de descaraga del SAG tiene 38mm de abertura.

Número de molinos de minerales: Hay cuatro molinos para la molienda:

- Un molino SAG de 38' de diámetro y 19' de largo y la potencia del motor de 27,000 HP
- tres molinos de bolas cada uno de 24' de diámetro por 36' de largo con un motor de 15,000 HP de potencia.



Figura 39: Vista de molino de minerales

Fuente: Minera Antamina

Por las diferentes zonas de mineral el mineral varía en cuanto a dureza y tamaño cobre solo o cobre zinc, por lo que se va a tratar en campañas y debemos moler a un producto de 80% pasante de 150 micrones ó 100 micrones.

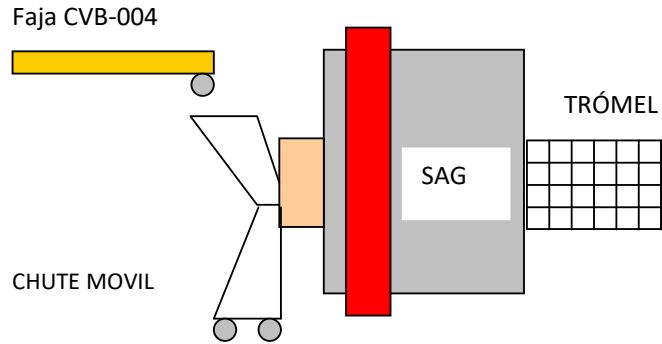


Figura 40: Esquema de molino alimentado con faja
Fuente: Minera Antamina

El nivel de carga de bolas en el molino se basa principalmente en el consumo de bolas historico.



Figura 41: Sistema de bombeo e inyección de agua al molino
Fuente: Minera Antamina

En la molienda del molino SAG, se usa un trómel integral equipado con aberturas de 13 mm y un cañon de retorno que cierra el circuito. La carga y las bolas de molienda descargan en el chute de alimentacion al molino SAG, en el que se agrega agua de proceso. La lechada de cal y cianuro de sodio (NaCN) se agregan al molino SAG para mineral de Cu-Zn y para Cu solo.



Figura 42: Evacuación de mineral del molino SAG
Fuente: Minera Antamina

El agua se agrega en el molino SAG en dos puntos: Se agrega al chute de carga y también en el sistema de retorno del trómel de descarga.



Figura 43: Vista lateral del molino SAG
Fuente: Minera Antamina

Después que la pulpa de mineral descarga por las aberturas del trómel, cae a una canaleta de descarga y luego pasa al cajon de distribución equipado con dos vertederos ajustables(a la canaleta de alimentación de los molinos 1 y 3), un vertedero fijo(hacia el cajon del molino2) y tres válvulas dardo. Cada válvula permite que el flujo de pulpa de mineral descargue por gravedad a uno de los tres cajones de bombas a los ciclones.

Para mantener una buena operación:

- Mantener % de solidos
- Flujo de agua del cañon del trómel del molino SAG (retorno de gruesos).
- Regimen de adición de lechada de cal al chute del molino SAG
- Alimentación de bolas al SAG: 6 – 10% Volumen de bolas.
- Sonido del molino SAG evitar sobrecarga ó molino vacío.
- Consumo de potencia
- Velocidad del molino: eficiencia de molienda

Mantenimiento y protección del equipo:

Inspeccionar con regularidad las siguientes áreas cada 2 horas o según lo indique la supervisión:

- Circuito de lubricación y sala.
- Monitoreo del motor del molino SAG.
- Enfriamiento del motor del molino SAG
- Sensores de torque, temperatura e impactómetro.

Seguridad y protección ambiental:

- Se sigan los procedimientos de bloqueo
- Se limpien todos los derrames tan pronto como sea posible.
- Se reconozca cualquier alarma relacionada con el circuito del molino SAG

Molienda y clasificacion de los molinos de bolas

El objetivo de la tercera etapa “Molienda en los molinos de bolas y clasificación” se basa en separar el producto fino del mineral.



Figura 44: vista superior de alimentación con lechada de cal al molino SAG

Fuente: Minera Antamina

En el circuito de Antamina, se usan ciclones para la clasificación de tamaños. El uso de ciclones es un método de separación por gravedad que no es costoso.

La válvula 2039 esta en la parte superior descarga de los molinos se abre en forma automática para que ingrese agua de proceso y lave la succión de la bomba.

Molienda en el molino de bolas:



Figura 45: Esquema de mando hidráulico del molino SAG

Fuente: Minera Antamina

Los molinos de bolas reciben el grueso de los ciclones que se descargan por gravedad, tambien reciben las bolas que se agregan de 3“ o 2 ½” de acuerdo a lo que se necesite potencia del molino, de acuerdo al tipo de mineral tambien se agregan lechada de cal,

cianuro de sodio, PAX en la canaleta de recolección de gruesos, además se tiene instalados las tuberías de los reactivos sulfato de zinc, para situaciones que el mineral lo requiera.

Durante la operación del circuito de molienda se debe tener en cuenta:

- Eficiencia de molienda del molino de bolas, radio de reducción.
 - Carga de bolas
 - Consumo de potencia
 - Caudal de pulpa y densidad de pulpa que ingresa a los ciclones.
 - Lazos de control de nivel de los cajones (SUL).
 - Avisos y luces de alarmas que informa el estado operacional del circuito.
 - Los muestreadores y PSI indican que se alcance el tamaño de partícula de molienda adecuado, revisar línea evitar atoros.
 - Diferentes tipos de mineral que van a ser molidos.
 - Mantener un nivel de alimentación a los ciclones, si no es así hace que cierre o abra uno o dos ciclones.
 - Mantener el control de presiones en los nidos de los ciclones para tener el tamaño adecuado de partículas: más presión más fino será el rebalse y menos presión más grueso el rebalse.
 - Control de alimentación de bolas al molino de bolas: esto significa mantener la carga de bolas adecuada y asegurar una buena eficiencia de molienda.
 - La potencia relacionada con la velocidad del molino, no exceder la velocidad crítica de 75%
 - En base a la potencia se determina si se necesita agregar bolas a los molinos.
-
- **Fase 2: Determinación de los fallos funcionales y fallos técnicos**
Utilizando como fuentes de información para determinar los fallos (y los modos de fallo): consulta al histórico de averías, consultas al personal de mantenimiento y de producción y estudio de los diagramas lógicos y funcionales de la planta.

Tabla 14: Fallas funcionales y técnicas.
Fuente: *Elaboración propia*

| Ítem | Denominación | Código | Función | Fallo Funcional |
|------|--|-----------------|--|--|
| 1 | Sistema de arranque d motor principal accionamiento | 310-MLS 0001 | Arranque lino d motor y control de velocidad | Sobrecalentamiento bobinas de contactor electromagnéticos |
| 2 | Motor eléctrico 24000 Hl | 301 – MI 002 | Accionamiento d molino principal | Falta de energía eléctrica |
| 3 | Molino principal minerales | 310-MLS 001 | Moler minerales desde 1.7’’ hasta 1 mm | Rotura de acoplamiento con motor |
| 4 | Faja alimentadora minerales al molino | 240-CVB 0005 | Alimentación minerales | Rotura de faja Desperfecto rodamientos |
| 5 | Sistema de bombeo de lechada de cal | FV- 01201A | Alimentación de lechada de cal | Insuficiente presión flujo |
| 6 | Sistema de bombeo de agua al molino | FV- 01202A | Alimentación de agua al molino | Insuficiente presión flujo |
| 7 | Sistema de medición de impacto en molino | 410 MDI 001 | Medir el impacto de molienda minerales | Rotura o ensuciamiento de sensores y conexión |
| 8 | Sistema de lubricación de molino | 315-OLT 002 | Enfriar cojinetes | baja viscosidad, flujo presión |
| 9 | Clasificador rotativo mineral, Trommel | 415-MTL 001 | Clasificar minerales: mayor 17 mm y menor a 1 mm | Obtención d clasificador |
| 10 | Sistema de bombeo de pulpa | 310-PPS- 609 | Evacuar la pulpa mineral del molino | Falla eléctrica Rotura del rotor de bomba Falla en rodamientos motor/bomba |
| 11 | Manifold distribuidor de pulpa de mineral | 310-STP 674 | Colectar la pulpa desde molinos distribuirla | Obtención del Manifold |
| 12 | Tanque colector de pulpa de mineral | 310-STP- 661 | Almacenamiento distribución de pulpa | Rotura de tanque Falla en sistema de evacuación |
| 13 | Sistema de bombeo de pulpa de mineral clasificador centrífugas | 310-PPS- G12 | Suministro de pulpa de mineral | Falta de presión Falla del motor accionamiento |
| 14 | Separador centrífugo mineral acabado | 310-CSC 001 | Clasificar producto final y retorno reproceso | Desgaste y rotura cuerpo del separador |
| 15 | Molino de mineral recuperador | 310-MLB 001 | Reprocesar mineral | |

Histórico de averías

Diagramas lógicos y diagramas funcionales

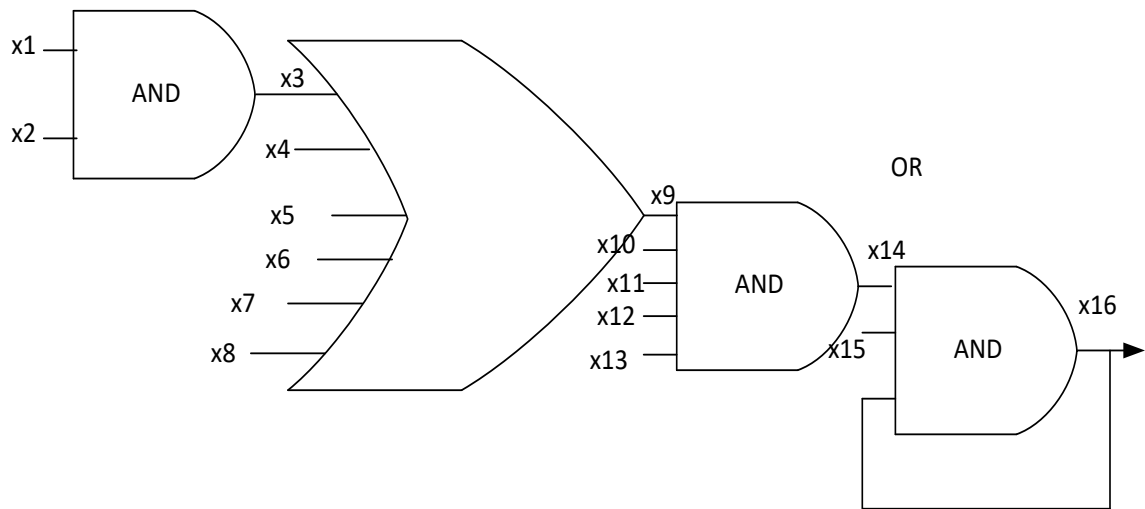


Figura 46: Diagrama lógico de fallas del sistema de molinos

Fuente: Planta Antamina

Leyenda:

- X1: señal eléctrica control velocidad y potencia, Hz
- X2: Potencia eléctrica absorbida por motor, kw
- X3: Potencia mecánica rotativa, kw
- X4: Flujo de agua a molino, kg/h
- X5: Flujo de lechada de cal a molino, kg/h
- X6: Flujo de minerales a molino, kg/h
- X7: Mediciones de impacto en molino, N
- X8: Flujo de lubricante a molino de minerales, kg/h
- X9: Salida de pulpa de mineral, de molino, kg/h
- X10: Salida de mineral clasificado, de Trommel, menor a 13 mm
- X11: Bombeo de pulpa de mineral, kg/h
- X12: Colector distribuidor de pulpa
- X13: Almacenamiento y distribución de pulpa, kg/h
- X14: Bombeo de pulpa de mineral a separador centrífugo, kg/h
- X15: Molienda auxiliar, de recuperación
- X16: Separador y redistribuidor de mineral final

Fase 3: Determinación de los modos de fallo

Fallos y modos de fallo en el motor eléctrico que acciona el molino principal de minerales

Tabla 15: Análisis de criticidad de fallo. Fallo Crítico

Fuente: Elaboración propia

| ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE FALLOS | | | | |
|--|---|---|---|---|
| SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE | | PRODUCCIÓN | | MANTENIMIENTO |
| Accidente grave probable | C | Supone parada o afecta a potencia y rendimiento | C | Alto costo de reparación (más de 15,000 \$) |
| Accidente grave, pero muy poco probable | | Afecta a potencia y/o rendimiento, pero el fallo es poco probable | | Costo medio de reparación (1500 a 15000)\$ |
| Poca influencia en seguridad y medioambiente | | No afecta a la producción | | Bajo costo de reparación (menos de 1500 \$) |

Fallo importante:

- No debe cumplir ninguna de las condiciones que lo hagan crítico
- Debe cumplir alguna de estas condiciones:
- Que el coste de reparación sea medio

Tabla 16: Análisis de criticidad de fallo.

Fuente: *Elaboración propia*

| ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE FALLOS | | | | |
|--|---|--|---|---|
| SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE | | PRODUCCIÓN | | MANTENIMIENTO |
| Accidente grave probable | | Supone parada afecta a potencia y rendimiento | | Alto costo de reparación (más de 15,000 \$) |
| Accidente grave, pero muy poco probable | | Afecta a potencia y rendimiento, pero fallo es poco probable | | Costo medio de reparación (1500 a 15000)\$ |
| Poca influencia en seguridad y medioambiente | 1 | No afecta a la producción | 1 | Bajo costo de reparación (menos de 1500 \$) |

Elaboración propia

Tabla 17: Tareas de mantenimiento Preventivo para sistema de Molienda
Fuente: *Elaboración propia*

| TIPOS DE TAREAS DE MANTENIMIENTO | TIPOS DE FALLO A LO QUE PUEDE APLICARSE |
|--|--|
| 1. Inspecciones visuales | Todos los fallos |
| 2. Tareas de lubricación | Todos los fallos |
| 3. Verificaciones ON LINE | Todos los fallos |
| 4. Verificaciones OFF LINE | FALLOS IMPORTANTES CRÍTICOS |
| Verificaciones sencillas | |
| - Mediciones de temperatura | |
| - Mediciones de vibración (con Vibrómetro) | |
| - Mediciones de intensidad de corriente | |
| Etc | |
| Verificaciones con instrumentos complejos | |
| - Análisis de vibraciones (con analizador) | |
| - Termografías | |
| - Detección de fugas por ultrasonidos | |
| - Análisis de la curva de arranque de motores | |
| - Comprobación de alineamiento Laser | |
| - Etc | |
| 5. Tareas Condicionales (según los resultados las verificaciones anteriores) | FALLOS IMPORTANTES CRÍTICOS |
| Limpieza según condición | |
| Ajustes según condición | |
| Sustitución de piezas según su estado | |
| 6. Tareas sistemáticas (haya o no síntomas de fallo) | SÓLO FALLOS CRÍTICOS |
| Limpiezas sistemáticas | |
| Ajustes sistemáticos | |
| Sustitución sistemática de piezas de desgaste | |
| 7. Mantenimiento cero horas (sustitución de todos los elementos sometidos a desgaste) | SÓLO FALLOS CRÍTICOS |

ÁRBOL LÓGICO DE DECISIÓN DEL MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD

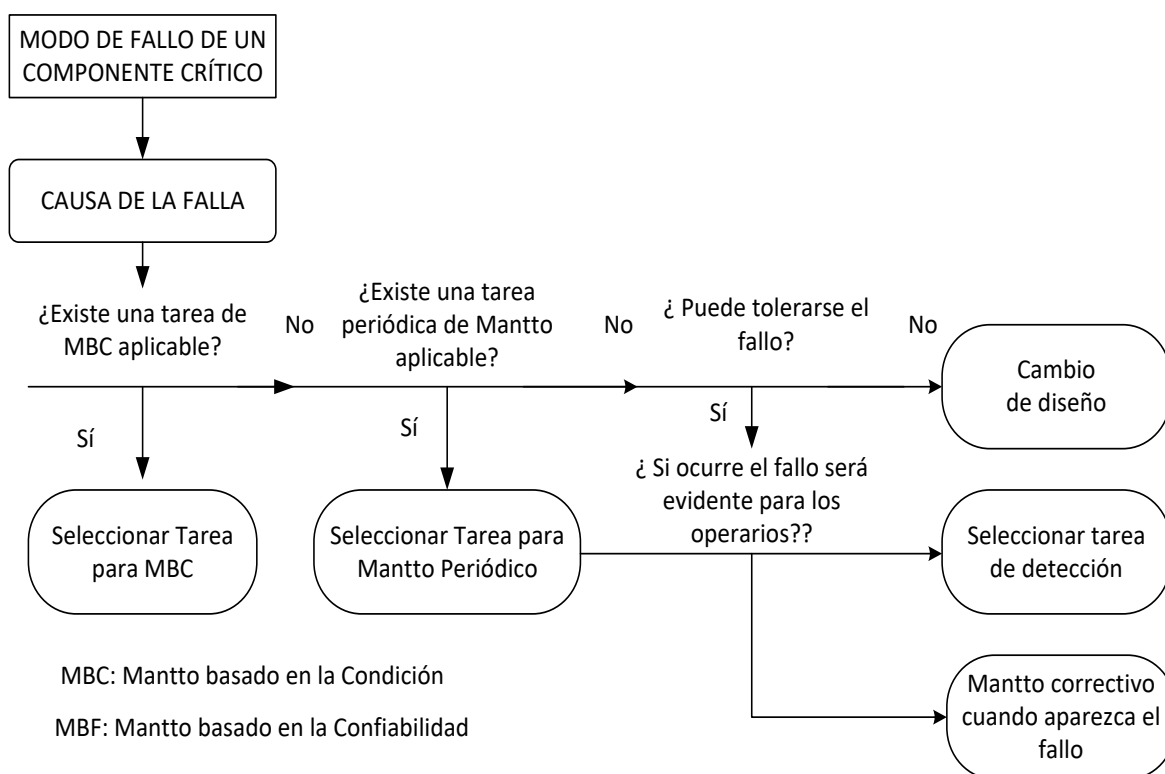


Figura 47: Árbol lógico de decisión del RCM.

Fuente: Elaboración propia

Determinación de la frecuencia de las tareas de mantenimiento

En este caso se toma como frecuencia de mantenimiento igual a una vez cada dos semanas, por un lapso de 15 horas por vez.

El criterio es que el tiempo medio de operación hasta la falla, MTTF sea igual, por lo menos a 312 horas, correspondiente a 14 días de operación

Al lograr este objetivo se obtendrá Confiabilidad de 37%, cuando el tiempo medio de operación hasta la falla iguale al tiempo base de operación.

MEJORAS Y MODIFICACIONES DE LA INSTALACIÓN DE MOLIENDA

Cambios en los materiales.

En sistema de lubricación: cambio del aceite lubricante actual, SAE 40 por aceite sintético

En molino: cambio del material para los yunques del molino, que utilizan acero STM A 192 por acero al manganeso, con la finalidad de darle más tenacidad y resistencia al impacto y relleno por soldadura de recubrimiento duro

Cambios en el diseño de una pieza.

En alojamiento de rodamientos de bombas: para instalar rodamientos de contacto angular, serie 7208 en lugar de rodamientos de bolas rígidos, 6808

Instalación de sistemas de detección de vibraciones, con sensores de impacto, en motores que accionan las bombas de agua y lubricante

Cambios en el diseño de una instalación.

Por el momento no es necesaria alguna medida de este tipo.

Cambios en las condiciones de trabajo del ítem.

Se recomienda al Departamento de laboratorio que analice la posibilidad de modificar la lechada de cal que ingresa al molino de minerales y se pueda obtener una mezcla menos dura y con un pH mayor, que sea alcalino totalmente, mayor a 8 de pH

Cambios en los procedimientos de operación

Prevía capacitación, se deberá cambiar el modo de arranque, instalación de control PID de temperatura del agua al molino, y de variación de la carga del molino con variación de velocidad de la faja de alimentación, con variador de frecuencia

Formación

Capacitación en lecturas de planos eléctricos, neumáticos e hidráulicos del personal de mantenimiento y de operación.

- El plan de mantenimiento inicial está basado en las recomendaciones de los fabricantes.

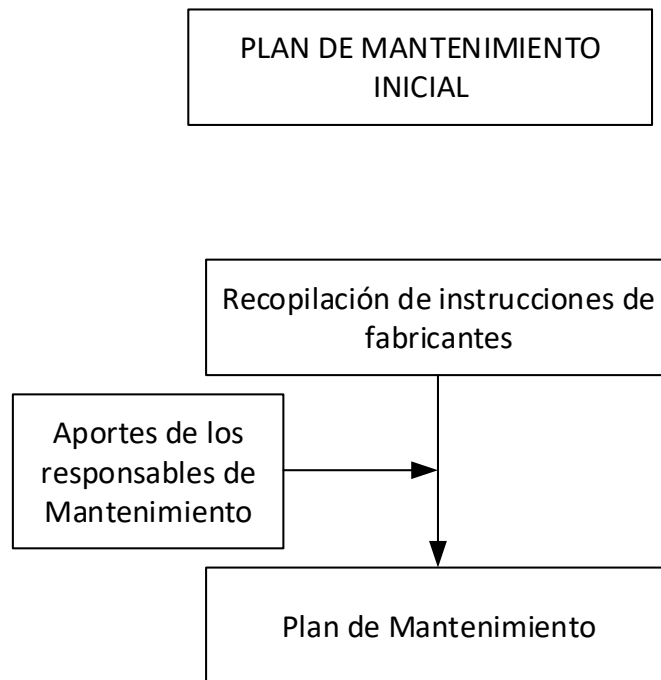


Figura 48: Diagrama de flujo para la elaboración de un plan de mantenimiento basado en recomendaciones de los fabricantes

Fuente: Elaboración propia

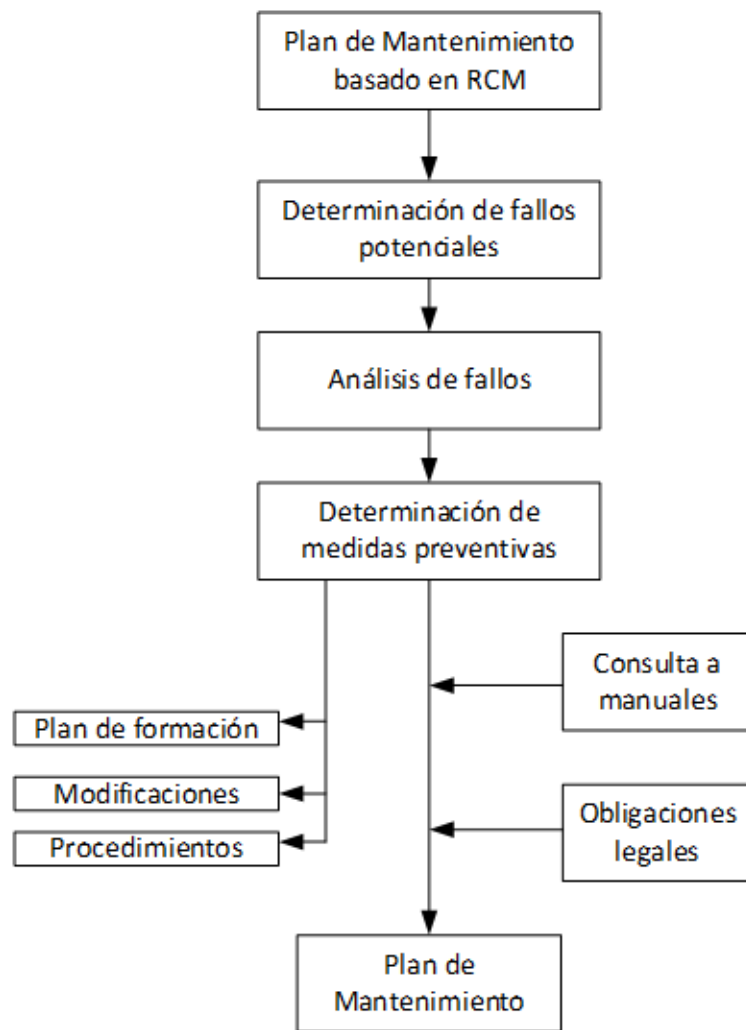


Figura 49: Diagrama de flujo de la elaboración del plan de mantenimiento basado en el análisis de fallos
Fuente: Elaboración propia

Análisis económico

Determinar el Costo de Inversión

- Analizador de vibraciones: 7500 \$
- Analizador de aceites: 2500 \$
- Analizador de espesores metálicos, con ultrasonidos: 6000 \$
- Cámara termográfica: 25,000 \$
- Analizador de fugas de gases: 7200 \$
- Alineador laser: 8500 \$
- Equipo de monitoreo de condición para elementos rotatorios: 35,000 \$

- Capacitación del personal: 6000 \$

Total, monto de inversión para adquirir equipos de técnicas predictivas y capacitación:
97,700 \$

Costo de operación:

Será en mano de obra que se contratará para el manejo de los dispositivos

Tres ingenieros mecánicos electricistas

: 3500 NS/mes

Costo anual de operación: 3 ingenieros*3500 NS/mes *14 meses/año = 147,000 NS/año
= 42,608 \$/año

Costo adicional de mantenimiento:

- En molino: 500,000 \$/año
- En sistema de lubricación: 10,000 \$/año
- En sistema de bombeo agua a Molino: 10,000 \$/año

Total, costo adicional de mantenimiento: 520,000 \$/año

Beneficio por la implementación de Mantenimiento Preventivo basado en la Confiabilidad.

Reducción del tiempo de parada por eliminación de fallas

Se cuantifica solamente las fallas que se pueden detectar con técnicas predictivas:

Por vibraciones: 10 h/año

Por alta temperatura: 5 h/año

Por desalineamiento de ejes y acoplamientos: 15 h/año

Por degradación del aceite: 12 h/año

Por desgaste de elementos del molino debido a impacto y abrasión: 15 h/año

Total, reducción de horas de parada de producción debido a fallas detectables con técnicas predictivas: 57 horas/año

3.2 Estimación de los indicadores de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad después del proceso de mejora y sustentar los costos-beneficio y recuperación de la inversión.

1. Cálculo de la disponibilidad proyectada por implementar técnicas predictivas

En condiciones actuales, con Mantenimiento Preventivo sin técnicas predictivas:

Tiempo calendario TC = 8,760h/año

Tiempo de mantenimiento preventivo, programado (TMP):

$$\text{TMP} \left[\frac{\text{h}}{\text{año}} \right] = \text{Nr. días anuales de MP} \left[\frac{\text{Días}}{\text{año}} \right] * \text{Nr. horas por día} \left[\frac{\text{h}}{\text{día}} \right]$$

$$\text{TMP} \left[\frac{\text{h}}{\text{año}} \right] = 24 \left[\frac{\text{Días}}{\text{año}} \right] * 15 \left[\frac{\text{h}}{\text{día}} \right] = 360 \frac{\text{h}}{\text{año}}$$

Tiempo de mantenimiento correctivo, sin técnicas predictivas (TMC):

$$\text{TMC} \left[\frac{\text{h}}{\text{año}} \right] = \sum_{i=1}^n \text{TMC}_i$$

$$\sum_{i=1}^n \text{TMC}_i = \text{suma de tiempos de parada de producción por fallas, de Mantto correctivo}$$

$$\text{Reemplazando: TMC} \left[\frac{\text{h}}{\text{año}} \right] = 173.5 \frac{\text{h}}{\text{año}}$$

Tiempo neto de producción: **TNP: 8010.5 h/año**

De acuerdo a la clasificación de tiempos perdidos por tipos de fallas, las cuales serán analizadas y monitoreadas con técnicas predictivas, de tal modo que sean detectadas en su fase temprana y programarlas para reparación en el período de mantenimiento preventivo programado, se asume que, en promedio se reducirá el tiempo total de 173.5 h/año actual a 116.6 h/año, pues las 57 h/año menos se refieren a las horas de parada de producción que se evitarán por implementar técnicas predictivas para asistir el mantenimiento preventivo

En condiciones actuales, con Mantenimiento Preventivo sin técnicas predictivas:

Tiempo calendario TC = 8,760 h/año

Tiempo de mantenimiento preventivo, programado, TMP = 360 h/año

$\sum_{i=1}^n \text{TMC}_i$ = suma de tiempos de parada de producción por fallas, de Mantto correctivo

$$\text{Reemplazando: TMC} \left[\frac{\text{h}}{\text{año}} \right] = 116.6 \frac{\text{h}}{\text{año}}$$

Tiempo programado de producción TPP:

$$\text{TPP} \left[\frac{\text{h}}{\text{año}} \right] = \text{TC} - \text{TMP}$$

$$\text{Reemplazando: TPP} \left[\frac{\text{h}}{\text{año}} \right] = 8,760 - 360 = 8400 \frac{\text{h}}{\text{año}}$$

Tiempo neto de producción TNP:

$$\text{TNP} \left[\frac{\text{h}}{\text{año}} \right] = \text{TC} - \text{TMP} - \text{TMC}$$

$$\text{Reemplazando: TNP} \left[\frac{\text{h}}{\text{año}} \right] = 8,760 - 360 - 116.6 = 8,283.4 \frac{\text{h}}{\text{año}}$$

Disponibilidad anual de sistema molienda primaria, D

$$D_{\text{anual}} = \frac{\text{TNP}}{\text{TPP}} * 100 = \frac{8,283.4 \frac{\text{h}}{\text{año}}}{8400 \frac{\text{h}}{\text{año}}} * 100 = 98.61 \%$$

Tabla 18: Resultados de análisis de disponibilidad

Fuente: *Elaboración propia*

| Tiempo calendario | Tiempo Mttc Preventivo Programado | Tiempo Programado de Producción | Tiempo Mt Correctivo | Tiempo Neto de Producción | Disponibilidad Proyectada, Mantto Preventivo con Técnicas Predictivas |
|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------|---|
| h/año | h/año | h/año | h/año | h/año | % |
| 8760 | 360 | 8400 | 116.6 | 8283.4 | 98.61% |

Incremento de la disponibilidad del molino SAG por implementación del mantenimiento RCM basado en técnicas predictivas:

$$\Delta D = D_2 - D_1 = 98.61 - 97.88 = 0.73 \%$$

Cálculo del MTTF proyectado, con mantenimiento preventivo basado en técnicas predictivas

El MTTR no cambia, es decir, el tiempo de reparación es constante, no se cambia el procedimiento

$$D_2 = \frac{MTTF_2}{MTTF_2 + MTTR_1}$$

$$\text{Reemplazando: } 0.9861 = \frac{MTTF_2}{MTTF_2 + 1.79} \rightarrow MTTF_2 = 127.00 \frac{\text{h}}{\text{vez}}$$

2. Confiabilidad proyectada del sistema de molienda primaria, con técnicas predictivas:

$$\text{Tasa de falla, promedio anual: } \lambda = \frac{1}{MTTF}$$

$$\text{Tasa de falla, promedio anual: } \lambda = \frac{1}{127.00} = 0.007874 \frac{\text{Hrs}}{\text{falla}}$$

Confiabilidad promedio anual:

$$C_t = \left(e^{\frac{-\lambda * TTP}{100}} \right) * 100$$

$$C_t = \left(e^{\frac{-0.007874 * 8400}{100}} \right) * 100$$

$$C_t = 51.62\%$$

Se obtiene un valor de la confiabilidad de 51.62%, superior al objetivo de la empresa que es obtener 45% como mínimo; por lo tanto, el Incremento de la confiabilidad del sistema de molienda es:

$$\Delta I = 51.62 - 37.45 = 14.17 \%$$

Cálculo de la mantenibilidad del molino SAG, en mejora:

$$\text{Tasa de reparación, promedio anual: } \mu = \frac{1}{\text{MTTR}}$$

$$\text{Tasa de reparación, promedio anual: } \mu = \frac{1}{1.79}$$

$$\mu = 0.56 \frac{\text{reparaciones}}{\text{h}}$$

Mantenibilidad del Molino de bolas, anual:

$$M_t = \left(1 - e^{\frac{-\mu * \text{TTR}}{100}} \right) * 100$$

$$M_t = \left(1 - e^{\frac{-0.56 * 116.6}{100}} \right) * 100$$

$$M_t = 48\%$$

Se obtiene un valor de la mantenibilidad de 48.00%, inferior al inicial de la empresa que es obtener 62.15%; por lo tanto, el decremento de la mantenibilidad del sistema de molienda es:

$$\Delta I = 48.00 - 62.15 = -14.15 \%$$

Tabla 19: Cuadro resumen comparativo
Fuente: Elaboración propia

| MTTF Antes H/falla | MTTF Mejora H/falla | MTTR Antes H/falla | MTTR Mejora H/falla | D_o Antes % | D_o Mejora % | C_t Antes % | C_t Mejora % | M_t Antes % | M_t Mejora % |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|-------------------|
| 82.58 | 127.0 | 1.79 | 1.79 | 97.88 | 98.61 | 37.45 | 51.62 | 62.15 | 48.00 |

Beneficio económico bruto por reducción de tiempo de parada por eliminación de fallas detectables con técnicas predictivas:

$$BEB \left[\frac{NS}{año} \right] = Cu_{\text{electrolítico-recuperable}} \left[\frac{TM}{año} \right] * \text{Precio Venta Cu} \left(\frac{USA \$}{TM} \right) * \% \text{ utilidad}$$

$$LC \left[\frac{NS}{año} \right] = 78.8 \left[\frac{TM}{h} \right] * 57 \frac{h}{año} * 5,303 \left(\frac{USA \$}{TM} \right) * 0.45 = 10'718,529 \frac{USA\$}{año}$$

Beneficio económico neto:

BEN = BEB – Costos de operación – Costos adicionales de Mantenimiento

$$10'718,529 - 42,608 - 520,000 = 10' 155,921 \text{ USA\$/año.}$$

Período de retorno de la inversión:

$$ROI = \frac{I}{BEN} = \frac{97,700 \$}{10'155,921 \frac{USA\$}{año}} = 9.62 * 10^{-3} \text{ años} = 0.115 \text{ meses}$$

Es bastante atractiva la inversión, pues se tiene un gran beneficio económico neto anual.

IV. DISCUSIÓN

- **Análisis comparativo con tesis 2:** Adriana María Ruiz Acevedo (2012.). **“Modelo para la implementación de mantenimiento predictivo en las facilidades de producción de petróleo”**, Universidad industrial de Santander, Facultad de ingenierías físico – mecánicas, Escuela de ingeniería mecánica, Especialización en gerencia de mantenimiento, Bucaramanga-Colombia. En conclusión, para la **Universidad industrial de Santander** el mantenimiento predictivo ha demostrado ser una herramienta fundamental para los gerentes de mantenimiento que deseen implementar una estrategia de mantenimiento, pensada en la gestión de activos.

Con este proyecto, Hocol empezó a disfrutar de estos beneficios en sus activos del campo San Francisco.

En conclusión, **Tesis Universidad César Vallejo**

Las pérdidas de producción disminuyeron al incrementarse el tiempo de operación, óptimo de los activos y programando las paradas para corregir los daños incipientes en los activos. En la misma línea, la disponibilidad se incrementó por la planeación adecuada de los recursos, además que la mayoría de los muestreos realizados fueron en línea, con el equipo operando.

- **Análisis comparativo con tesis 3:** Lee medina Hugo (junio 2010). **“Diseño de un plan de mantenimiento preventivo asistido por técnicas predictivas en equipos críticos del sector de molienda en empresa cementeras con vista al aumento de su fiabilidad operacional”**, Universidad César Vallejo – Trujillo Perú.

En conclusión, para **Tesis UCV 2010** se determina que es conveniente invertir en implementar un Plan de mantenimiento Preventivo asistido por técnicas preventivas para aumentar los indicadores de mantenimiento, y reducir los costos operativos, racionalizando los recursos.

Se evidencia la necesidad de capacitar al personal de mando y operativo en las técnicas de mantenimiento. El retorno de la inversión se logra en seis meses.

En conclusión, para **Tesis UCV actual, 2016**

Se determina que es conveniente aplicar RCM basado en técnicas predictivas pues se obtiene un incremento razonable de la Disponibilidad, aunque no mucho en la Confiabilidad

La capacitación del personal que manejará los instrumentos de análisis predictivo demandará una inversión estimada de 3,000 \$.

V. CONCLUSIONES

1. Se determinaron las condiciones actuales e indicadores de Mantenimiento de equipos y maquinarias del sector de molienda, como son la disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad, utilizando técnicas estadísticas.
 - Disponibilidad anual = 97.88%, menor a la proyectada por Antamina, que es igual o mayor a 98.5%
 - Confiabilidad en base a (MTTF = 82.58 h/falla), que es 37.45%, considerada muy baja para el sistema.
 - Mantenibilidad en base a (MTR = 1.79 h/falla), que es 62.15%, considerada muy alta para el sistema.
2. Se identificaron los equipos críticos, sujetos a mantenimiento predictivo, resultando como elemento muy crítico el molino SAG; asimismo, se determinaron las pérdidas económicas por fallas de equipos y maquinarias que ocasionan lucro cesante.

Lucro cesante por pérdida de producción debido a fallas:

$$10'718,529 \frac{\text{USA\$}}{\text{año}}$$

Es bastante elevado, debido a la cantidad de metal dejada de producir, 78.8 TM de metal/h y su precio de venta, de 5,303 USA\$/TM

3. Se determinaron las técnicas predictivas y equipos que se pueden implementar en equipos y maquinarias críticas seleccionadas.

Las técnicas predictivas a ser aplicadas a los elementos críticos son:

- Análisis vibracional
- Análisis de calidad del aceite de lubricación
- Análisis de distribución y magnitud de la temperatura
- Medición de espesores metálicos
- Medición de fugas de gases
- Medición del ph del agua de enfriamiento del aceite

Los equipos para aplicar las técnicas predictivas son:

- Analizador de vibraciones, 0 a 10 m/s de velocidad de vibración

- Analizador del aceite: 0 a 50 mm²/s
 - Cámara termográfica, 0 a 300 °C
 - Analizador de espesores por ultrasonidos, de 0 a 100 mm
 - Analizador de fugas de gases por ultrasonidos, de 0 a 10,000 m³/h
 - Analizador de ph, 0 a 14
4. Se seleccionaron la tecnología y los métodos para reparar las fallas detectadas por las técnicas predictivas.
- Se deberá adquirir:
- Un alineador laser, para corregir las fallas por desalineamiento
 - Un equipo de monitoreo de vibraciones portable
 - Un equipo de medición de temperatura (cámara termográfica)
 - Equipo de ultrasonido
 - Equipo de monitoreo de condición para elementos rotatorios
5. Se preparó un Plan de Mantenimiento basado en la Confiabilidad, basado en los 7 pasos recomendados por la literatura de especialidad, tratando de ser específico para las condiciones de trabajo de Antamina.
6. Se estimaron los indicadores de mantenimiento post mejora mediante el plan o proceso de mejora, proyectando las siguientes cifras:
- Disponibilidad anual = 98.67%, mayor a la proyectada por Antamina, que es igual o mayor a 98.5%
- Confiabilidad en base a (MTTF = 127.00 h/falla), que es 51.62%, considerada muy aceptable y sobre el estándar proyectado.
- Mantenibilidad en base a (MTR = 1.79 h/falla), que es 48.00%, considerada aceptable para el sistema.
- Finalmente, se determinó el Costo de Inversión, Operación mas el beneficio implementación del mantenimiento.
- Costo de inversión en equipos: 97,700 USA \$
 - Costo de operación: 42,608 \$/año
 - Beneficio económico neto: 10'718, 529 USA\$/año
 - Tiempo de retorno de la inversión: 0.115 meses

VI. RECOMENDACIONES

- Debido a que se logra aumento de la disponibilidad desde 97.88 hasta 98.61 % se recomienda implementar el nuevo sistema de mantenimiento RCM, basado en técnicas predictivas.
- Como el incremento de la confiabilidad es bastante pobre, desde 2.99 hasta 9.75 % solamente, se recomienda que las paradas por mantenimiento preventivo quincenales no sean de solamente 15 horas sino de 24 horas, aumentando la intensidad de mantenimiento preventivo.
- También se recomienda evaluar el estado de los equipos en función de su vida útil, es decir, definir si es conveniente seguir operando y dándoles mantenimiento o renovar con equipos de mejor tecnología.
- Se recomienda que se implemente el mantenimiento mejorativo, es decir, en base al enfoque causa raíz, determinar mejoras, que pueden ser operativas, cambio de materiales o diseño, para lograr un aumento del tiempo medio de operación hasta la falla y el consecuente aumento de la confiabilidad hasta alcanzar los valores establecidos por la empresa de $R = 45\%$.
- Establecer un programa anual de capacitación del personal en cursos de análisis vibracional, técnicas predictivas, balanceo dinámico, para tener precisión en los resultados medidos.
- Implementar el departamento de mantenimiento predictivo en Antamina, contratando personal calificado, sus equipos y la capacitación requerida.
- Luego de un cierto tiempo, puede ser tres años, definir la posibilidad de implementar el TPM en Antamina, el mantenimiento productivo total.
- Incluir mantenimiento mejorativo para los subsistemas mecánicos externo e interno del molino, que están sometidos a fuertes fenómenos de desgaste, pro abrasión y erosión, lo cual dificulta mucho obtener un aumento significativo de confiabilidad, hasta 45%, como lo señala la administración de Antamina,

VII. REFERENCIAS :

- Asociacion Latinoamericana de Mantenimiento. (23 de 10 de 2011). *Mantenimiento Mundial*. Recuperado el 18 de 12 de 2015, de Mantenimiento Mundial: <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/tipos.asp>
- DUFFUAA, S., RAOUF, A., & DIXON, J. (2000). *Sistemas de Mantenimiento Planeación y Control*. MEXICO D.F: Grupo Noriega Editores.
- J.C.S.F. (11 de 07 de 2002). *Solo Mantenimiento* . Recuperado el 12 de 06 de 2015, de Solo Mantenimiento: www.solomantenimiento.com
- MARTÍNEZ R., L. (2007). *Organización y planificación de Sistemas de Mantenimiento*. Caracas: Centro de Altos Estudios Gerenciales.
- Monografias.com S.A. (11 de 04 de 2010). *Mantenimiento Predictivo*. Recuperado el 21 de 06 de 2015, de Monografias.com: <http://www.monografias.com/trabajos17/mantenimiento-predictivo/mantenimiento-predictivo.shtml#ixzz3T59klyA9>
- MOUBRAY, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. RCM II*. Buenos Aires: Ellman Suerios y Asociados.
- MUÑOZ ABELLA, B. (2004). *Mantenimiento industrial*. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- PREDYMAQ – INTER ANDEAN TRADING SAC. (21 de 08 de 2013). *SEMAPI.com*. Recuperado el 16 de 07 de 2015, de http://www.semapi.com/es/beneficios_mantenimiento_predictivo.php

VIII. ANEXOS

- **ANEXO 1: GLOSARIO DE TÉRMINOS**

DIFERIDA: o downtime; es la pérdida de producción debido a factores ajenos a la operación normal de un equipo o sistema.

MCC: Mantenimiento centrado en confiabilidad.

ACR: Análisis de causa raíz.

FTA: (Fault tree analysis), análisis de árboles de fallas.

MTTF: Es el tiempo medio que transcurre para que se produzca una falla funcional.

TTF: Es el tiempo que transcurre para que ocurra una falla funcional.

MTBF: Es el tiempo medio entre fallas.

TBF: Es el tiempo que transcurre entre dos fallas consecutivas.

TOP: Tiempo de operación.

FALLA FUNCIONAL: Estado en el cual el activo físico o sistema es incapaz de cumplir, a un nivel de funcionamiento que sea aceptable para su propietario o usuario, con una función específica.

MODO DE FALLA: Un evento singular que causa una falla funcional.

CONTEXTO OPERACIONAL: Conjunto de circunstancias en las que se espera que opere un activo o sistema.

CONFIABILIDAD: Es la probabilidad en que un producto realizará su función prevista sin incidentes por un período de tiempo especificado y bajo condiciones indicadas.

MANTENABILIDAD: Facilidad de un ítem en ser mantenido o recolocado en condiciones de ejecutar sus funciones requeridas.

MANTENIMIENTO PREVENTIVO: Es el mantenimiento que se realiza en base a fechas calendarías en que se programa un activo para su mantenimiento, claro las fechas se determinan de tal manera que según las condiciones de operación permitan que el equipo no alcance el deterioro tal que falle; y de esta manera prevenir antes de que se presente la falla.

MANTENIMIENTO CORRECTIVO: Es el mantenimiento que se ejecuta a un activo después de ocurrida la falla del mismo, por lo que se debe de corregir todos los componentes fallidos en el evento.

MANTENIMIENTO PREDICTIVO: Es aquel mantenimiento nos permitirá hacer una predicción del activo en cuestión, por medio de las técnicas cuales quiera utilizar llámese (análisis de vibraciones, mediciones eléctricas voltaje, amperaje, resistencia, ultrasonidos, medición de espesores, termografías, etc.) y que puedan ser aplicadas.

TPM: Mantenimiento Productivo Total surgió en Japón gracias a los esfuerzos del Japan Institute of Plant Maintenance (JIPM) como un sistema destinado a lograr la eliminación de las seis grandes pérdidas de los equipos, a los efectos de poder hacer factible la producción “Just in Time”, la cual tiene como objetivos primordiales la eliminación sistemática de desperdicios.

JUST IN TIME: Justo a Tiempo, es un sistema de organización de producción de las fábricas de origen japonés que permiten incrementar la productividad.

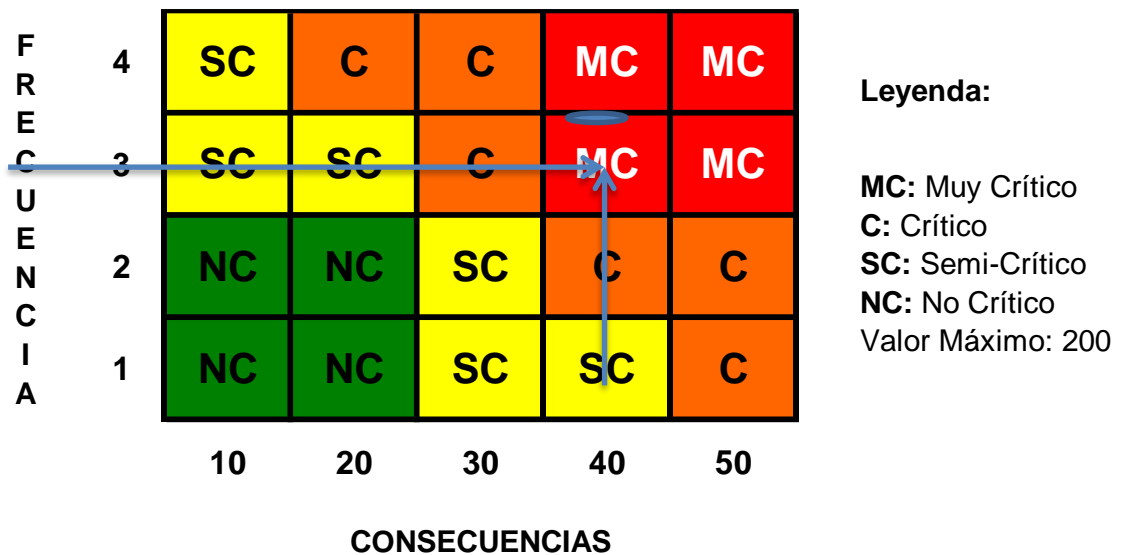
- **ANEXO 2:** Criticidad con matriz de criticidad (Améndola, 2002)

| CRITERIOS PARA DETERMINAR CRITICIDAD | CUANTF. |
|--|---------|
| Frecuencias de Falla | |
| Mayor a 4 fallas/año | 4 |
| 2-4 fallas/año | 3 |
| 1-2 fallas/año | 2 |
| Mínimo de 1 falla/año | 1 |
| Impacto Operacional | |
| Parada inmediata de toda la empresa | 10 |
| Parada de toda la planta (recuperable en otras plantas) | 6 |
| Impacto a niveles de producción o calidad | 4 |
| Repercute a costos operacionales adicionales (indisponibilidad) | 2 |
| No genera ningún efecto significativo sobre las demás operaciones | 1 |
| Flexibilidad Operacional | |
| No existe opción de producción y no hay forma de recuperarlo | 4 |
| Hay opción de repuesto compartido | 2 |
| Función de repuesto disponible | 1 |
| Costos de Mantenimiento | |
| Mayor o igual a \$20.000 | 2 |
| Menor o inferior a \$20.000 | 1 |
| Impacto en la Seguridad Ambiental y Humana | |
| Afecta la seguridad humana tanto externa como interna | 8 |
| Afecta el ambiente produciendo daños irreversibles | 6 |
| Afecta las instalaciones causando daños severos | 4 |
| Provoca daños menores (accidentes o incidentes) | 2 |
| Provoca un impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas | 1 |
| No provoca ningún tipo de daños a personas, instalaciones o ambiente | 0 |

Crterios y cuantificación de la criticidad de equipos

Fuente: Améndola, 2002

ANEXO 3: Matriz de Criticidad: Se muestra la intersección de la consecuencia y la frecuencia de falla ponderada, dando como resultado una falla media crítica para el elemento.



Fuente: Carlos Parra & Adolfo Márquez, 2012

- **ANEXO 4:** Precio Internacional del Cobre, por TM.

| Fecha | Precio \$ | Precio € |
|--------|-----------|-----------|
| - | | |
| feb-16 | 4,598.62 | 4.145,51€ |
| ene-16 | 4,471.79 | 4.117,67€ |
| dic-15 | 4,638.83 | 4.264,81€ |
| nov-15 | 4,799.90 | 4.470,85€ |
| oct-15 | 5,216.09 | 4.642,72€ |
| sep-15 | 5,217.25 | 4.649,54€ |
| ago-15 | 5,127.30 | 4.603,02€ |
| jul-15 | 5,456.75 | 4.962,49€ |
| jun-15 | 5,833.01 | 5.202,01€ |
| may-15 | 6,294.78 | 5.645,54€ |
| abr-15 | 6,042.09 | 5.605,42€ |
| mar-15 | 5,939.67 | 5.480,41€ |

- **Anexo 5:** REPORTE DE CONDICIÓN: SK-0515036
ELONGACIÓN DE PERNOS MOLINO BOLAS 001

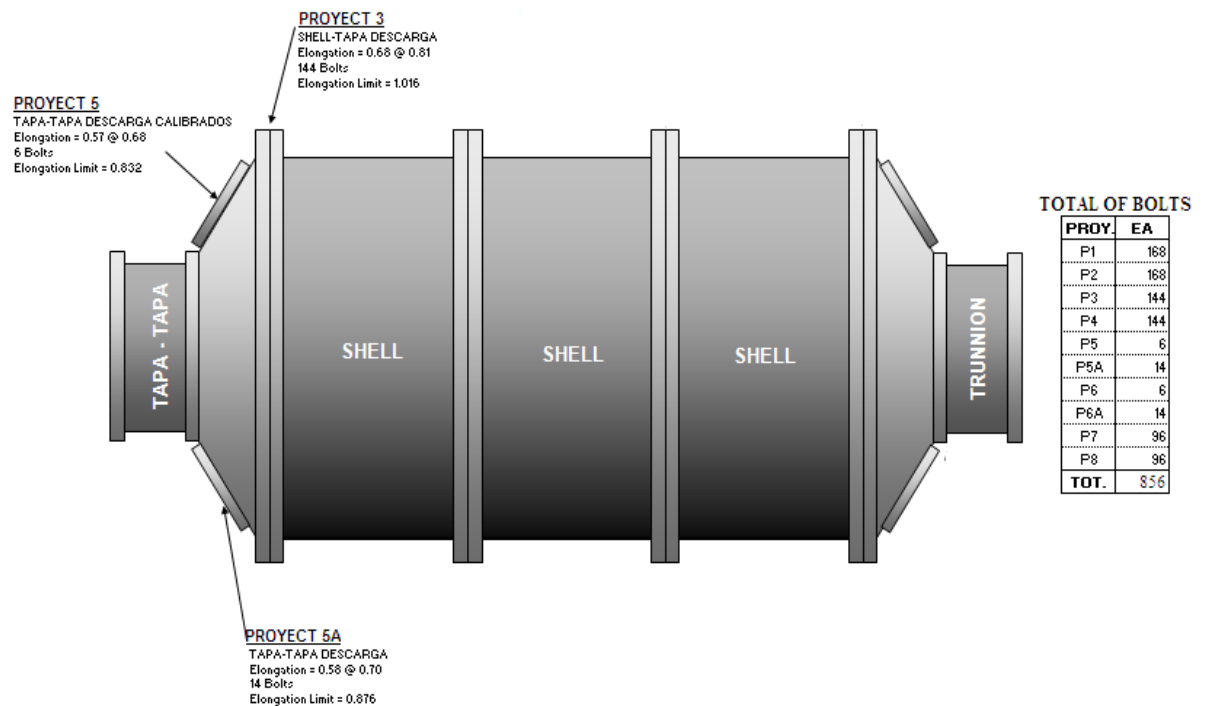
Para: Supervisión Mantenimiento
 De: Ingeniería de Mantenimiento / Mantenimiento Predictivo.
 Asunto: Elongación de pernos proyecto 5, 5A y 3 del Molino de Bolas 001.

OBJETIVO:

-Determinar la condición de ajuste de los pernos de los diferentes proyectos del Molino de Bolas 001.

PERNOS MEDIDOS: 75

| | | |
|--------------|------------------|------------------|
| -Proyecto 5 | 3 pernos medidos | Dentro del Rango |
| -Proyecto 5A | 7 pernos medidos | Dentro del Rango |
| -Proyecto 3 | 65pernos medidos | Dentro del Rango |

ZONA DE INTERES INSPECCIONADA:***PROYECTO 5***

Verificación: 29/04/2015

MLB001-P5 / TORC-UP

| N° Perno (Ea) | Tolerancia min. (mm) | Tolerancia Max. (mm) | Lecturas Elongación (mm) | Observaciones |
|------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 4 | 0.57 | 0.68 | 0.798 | Notas: Aceptable |

| | | | | |
|---|------|------|--------------|-----------|
| 5 | 0.57 | 0.68 | 0.768 | Aceptable |
| 6 | 0.57 | 0.68 | 0.772 | Aceptable |

PROYECTO 5A

| Verificación: 29/04/2015 MLB001-P5A / TORC-UP | | | | |
|--|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| N° Perno (Ea) | Tolerancia min. (mm) | Tolerancia Max. (mm) | Lecturas Elongación (mm) | Observaciones Notas: |
| 8 | 0.58 | 0.70 | 0.795 | Aceptable |
| 9 | 0.58 | 0.70 | 0.787 | Aceptable |
| 10 | 0.58 | 0.70 | 0.787 | Aceptable |
| 11 | 0.58 | 0.70 | 0.780 | Aceptable |
| 12 | 0.58 | 0.70 | 0.778 | Aceptable |
| 13 | 0.58 | 0.70 | 0.810 | Aceptable |
| 14 | 0.58 | 0.70 | 0.811 | Aceptable |

PROYECTO 3

| Verificación: 29/04/2014 MLB001-P3 / TORC-UP | | | | |
|---|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| N° Perno (Ea) | Tolerancia min. (mm) | Tolerancia Max. (mm) | Lecturas Elongación (mm) | Observaciones Notas: |
| 69 | 0.68 | 0.81 | 0.784 | Aceptable |
| 70 | 0.68 | 0.81 | 0.811 | Aceptable |
| 71 | 0.68 | 0.81 | 0.828 | Aceptable |
| 72 | 0.68 | 0.81 | 0.814 | Aceptable |
| 73 | 0.68 | 0.81 | 0.809 | Aceptable |
| 74 | 0.68 | 0.81 | 0.804 | Aceptable |
| 75 | 0.68 | 0.81 | 0.809 | Aceptable |
| 76 | 0.68 | 0.81 | 0.822 | Aceptable |
| 77 | 0.68 | 0.81 | 0.826 | Aceptable |
| 78 | 0.68 | 0.81 | 0.829 | Aceptable |
| 79 | 0.68 | 0.81 | 0.811 | Aceptable |
| 80 | 0.68 | 0.81 | 0.823 | Aceptable |
| 81 | 0.68 | 0.81 | 0.859 | Aceptable |
| 82 | 0.68 | 0.81 | 0.850 | Aceptable |
| 83 | 0.68 | 0.81 | 0.807 | Aceptable |
| 84 | 0.68 | 0.81 | 0.860 | Aceptable |
| 85 | 0.68 | 0.81 | 0.772 | Aceptable |
| 86 | 0.68 | 0.81 | 0.825 | Aceptable |
| 87 | 0.68 | 0.81 | 0.822 | Aceptable |
| 88 | 0.68 | 0.81 | 0.825 | Aceptable |
| 89 | 0.68 | 0.81 | 0.803 | Aceptable |
| 90 | 0.68 | 0.81 | 0.819 | Aceptable |

| | | | | |
|-----|------|------|--------------|------------|
| 91 | 0.68 | 0.81 | 0.831 | Acceptable |
| 92 | 0.68 | 0.81 | 0.827 | Acceptable |
| 93 | 0.68 | 0.81 | 0.734 | Acceptable |
| 94 | 0.68 | 0.81 | 0.810 | Acceptable |
| 95 | 0.68 | 0.81 | 0.772 | Acceptable |
| 107 | 0.68 | 0.81 | 0.870 | Acceptable |
| 108 | 0.68 | 0.81 | 0.815 | Acceptable |
| 109 | 0.68 | 0.81 | 0.805 | Acceptable |
| 110 | 0.68 | 0.81 | 0.796 | Acceptable |
| 111 | 0.68 | 0.81 | 0.809 | Acceptable |
| 112 | 0.68 | 0.81 | 0.792 | Acceptable |
| 113 | 0.68 | 0.81 | 0.769 | Acceptable |
| 114 | 0.68 | 0.81 | 0.799 | Acceptable |
| 115 | 0.68 | 0.81 | 0.803 | Acceptable |
| 116 | 0.68 | 0.81 | 0.809 | Acceptable |
| 117 | 0.68 | 0.81 | 0.811 | Acceptable |
| 118 | 0.68 | 0.81 | 0.761 | Acceptable |
| 119 | 0.68 | 0.81 | 0.809 | Acceptable |
| 120 | 0.68 | 0.81 | 0.794 | Acceptable |
| 121 | 0.68 | 0.81 | 0.766 | Acceptable |
| 122 | 0.68 | 0.81 | 0.821 | Acceptable |
| 123 | 0.68 | 0.81 | 0.794 | Acceptable |
| 124 | 0.68 | 0.81 | 0.789 | Acceptable |
| 125 | 0.68 | 0.81 | 0.804 | Acceptable |
| 126 | 0.68 | 0.81 | 0.796 | Acceptable |
| 127 | 0.68 | 0.81 | 0.791 | Acceptable |
| 128 | 0.68 | 0.81 | 0.807 | Acceptable |
| 129 | 0.68 | 0.81 | 0.774 | Acceptable |
| 130 | 0.68 | 0.81 | 0.809 | Acceptable |
| 131 | 0.68 | 0.81 | 0.768 | Acceptable |
| 132 | 0.68 | 0.81 | 0.840 | Acceptable |
| 133 | 0.68 | 0.81 | 0.796 | Acceptable |
| 134 | 0.68 | 0.81 | 0.794 | Acceptable |
| 135 | 0.68 | 0.81 | 0.780 | Acceptable |
| 136 | 0.68 | 0.81 | 0.797 | Acceptable |
| 137 | 0.68 | 0.81 | 0.807 | Acceptable |
| 138 | 0.68 | 0.81 | 0.808 | Acceptable |
| 139 | 0.68 | 0.81 | 0.798 | Acceptable |
| 140 | 0.68 | 0.81 | 0.819 | Acceptable |
| 141 | 0.68 | 0.81 | 0.814 | Acceptable |
| 142 | 0.68 | 0.81 | 0.781 | Acceptable |
| 143 | 0.68 | 0.81 | 0.808 | Acceptable |
| 144 | 0.68 | 0.81 | 0.791 | Acceptable |

OBSERVACIONES:

- Los 75 pernos de los proyectos 5, 5A y 3 inspeccionados todos se encuentran dentro de las tolerancias máximas permisibles.

- La elongación límite en el proyecto 5 es de hasta **0.832**
- La elongación límite en el proyecto 5A es de hasta **0.876**
- La elongación límite en el proyecto 3 es de hasta **1.016**

• **Anexo 6:**

Análisis predictivo de Pernos críticos Proyecto 3, Proyecto 5/5A. (310-MLB-001).

Inspectores:

Supervisor:

Fecha:

1. **OBJETIVO DE LA INSPECCIÓN:**

- Evaluar mediante Inspección visual (VT) y ultrasonido haz normal (UTN), a los pernos del proyecto P3, proyecto P5/5A del molino bolas MLB001, a fin de detectar defectos y/o discontinuidades del tipo fisuras, entre otras aplicables, que limiten su operatividad del equipo.
- Caracterizar discontinuidades, de existir estas en las zonas de interés.

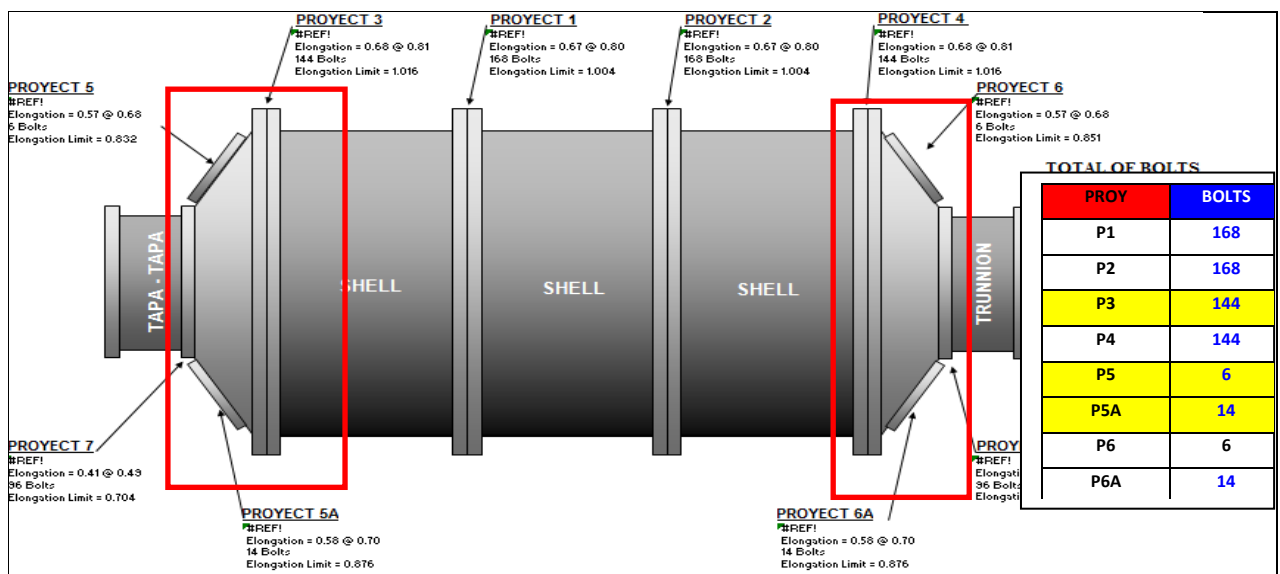
2. **IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO INSPECCIONADO**

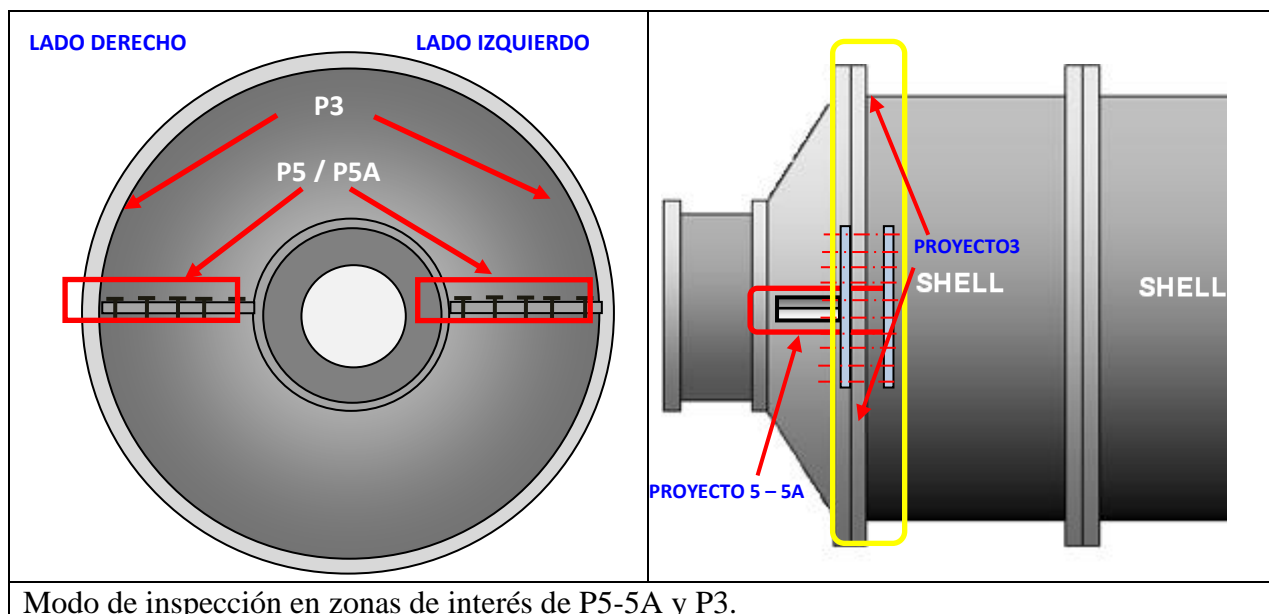
Equipo : Molino 310-MLB-001
 Código del perno : Según Tablas
 Material del perno : Acero al carbono
 Área inspeccionada : Según **CUADRO N°1**

3. **ESQUEMA DE INSPECCIÓN**

3.1 ESQUEMAS GENERALES

CUADRO N°1





4. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

4.1. INSPECCIÓN DE LOS PERNOS DEL PROYECTO 3.

4.1.1. PARÁMETROS DE INSPECCION DE PERNOS DE PROYECTO 3

Parámetros de Calibración

Consideraciones Generales:

- Equipo, Marca: OLYMPUS
- Modelo: EPOCH 600

Especificaciones de la evaluación:

- Rango : 500 mm
- Transductor : Haz normal, Ø ½" – 2.25 MHz.
- Velocidad del Material : 5920 m/s aprox.
- Ganancia de ref. : 50dB.
- Longitud del perno : 470mm. aprox.

4.1.2. RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN

Tabla N° 01 – PROYECTO 3

Cuadro Resumen de los Resultados - Inspección UTN – SCAN A Del Escaneo de los Pernos del Proyecto 3

| N° DE PERNO | NOTA | OBSERVACIONES |
|-------------|------|---------------|
|-------------|------|---------------|

| |
|---|
| 1 |
| 2 |
| 3 |
| 4 |
| 5 |

| N° DE PERNO | NOTA | OBSERVACIONES |
|--------------------|--------------|----------------------|
| 17 | perno normal | |
| 18 | perno normal | |
| 19 | perno normal | |
| 20 | perno normal | |
| 21 | perno normal | |
| 22 | perno normal | |
| 23 | perno normal | |
| 24 | perno normal | |
| 25 | perno normal | |
| 26 | perno normal | |
| 27 | perno normal | |
| 28 | perno normal | |
| 29 | perno normal | |
| 30 | perno normal | |
| 31 | perno normal | |
| 32 | perno normal | |
| 33 | perno normal | |
| 34 | perno normal | |
| 35 | perno normal | |
| 36 | perno normal | |
| 37 | perno normal | |
| 38 | perno normal | |
| 39 | perno normal | |
| 40 | perno normal | |
| 41 | perno normal | |
| 42 | perno normal | |
| 43 | perno normal | |
| 44 | perno normal | |
| 45 | perno normal | |
| 46 | perno normal | |
| 47 | perno normal | |
| 48 | perno normal | |
| 49 | perno normal | |
| 50 | perno normal | |
| 51 | perno normal | |
| 52 | perno normal | |
| 53 | perno normal | |

| | |
|----|--------------|
| 54 | perno normal |
|----|--------------|

| N° DE PERNO | NOTA | OBSERVACIONES |
|--------------------|--------------|----------------------|
| 55 | perno normal | |
| 56 | perno normal | |
| 57 | perno normal | |
| 58 | perno normal | |
| 59 | perno normal | |
| 60 | perno normal | |
| 61 | perno normal | |
| 62 | perno normal | |
| 63 | perno normal | |
| 64 | perno normal | |
| 65 | perno normal | |
| 66 | perno normal | |
| 67 | perno normal | |
| 68 | perno normal | |
| 69 | perno normal | |
| 70 | perno normal | |
| 71 | perno normal | |
| 72 | perno normal | |
| 73 | perno normal | |
| 74 | perno normal | |
| 75 | perno normal | |
| 76 | perno normal | |
| 77 | perno normal | |
| 78 | perno normal | |
| 79 | perno normal | |
| 80 | perno normal | |
| 81 | perno normal | |
| 82 | perno normal | |
| 83 | perno normal | |
| 84 | perno normal | |
| 85 | perno normal | |
| 86 | perno normal | |
| 87 | perno normal | |
| 88 | perno normal | |
| 89 | perno normal | |
| 90 | perno normal | |
| 91 | perno normal | |
| 92 | perno normal | |

4.2. INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO (HAZ NORMAL) SCAN A PERNOS (CRITICOS) PROYECTO 5 - 5ª

4.2.1. PARÁMETROS DE INSPECCIÓN DE PERNOS DE PROYECTO 5 – 5A

Parámetros de Calibración

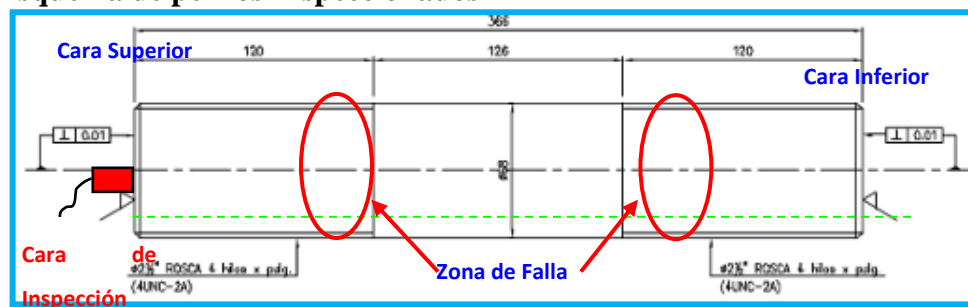
Consideraciones Generales:

- Equipo, Marca: OLYMPUS
- Modelo: EPOCH 600

Especificaciones de la evaluación:

- Rango : 500 mm
- Palpador : Transductor de Haz normal, Ø 0.5" - 5.0 MHz.
- Velocidad del Material: 5920 m/s aprox.
- Ganancia de ref. : 50 dB.
- Longitud de perno : 367 mm.

a) Esquema de pernos Inspeccionados



4.2.2. RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN

Tabla N° 02 – PROYECTO 5A

Cuadros Resumen de los Resultados - Inspección UTN – SCAN A

Del Escaneo de los Pernos del Proyecto 5A (14 unid.):

| N° DE PERN | NOTA | OBSERVACIONES |
|------------|--------------|---------------|
| 1 de P5A | perno normal | |
| 2 de P5A | perno normal | |
| 3 de P5A | perno normal | |
| 4 de P5A | perno normal | |
| 5 de P5A | perno normal | |
| 6 de P5A | perno normal | |

Tabla N° 03 – PROYECTO 5

Cuadros Resumen de los Resultados - Inspección UTN – SCAN A
Del Escaneo de los Pernos del Proyecto 5 (06 unidad.):

| Nº DE PERNO | NOTA | OBSERVACIONES |
|-------------|--------------|---------------|
| 1 de P5 | perno normal | |
| 2 de P5 | perno normal | |
| 3 de P5 | perno normal | |
| 4 de P5 | perno normal | |
| 5 de P5 | perno normal | |
| 6 de P5 | perno normal | |

Anexo 5:plano de revestimientos interior molino SAG

